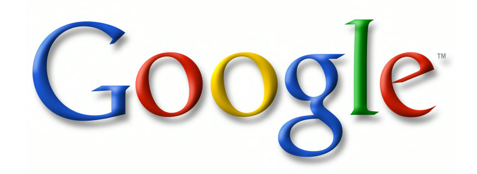
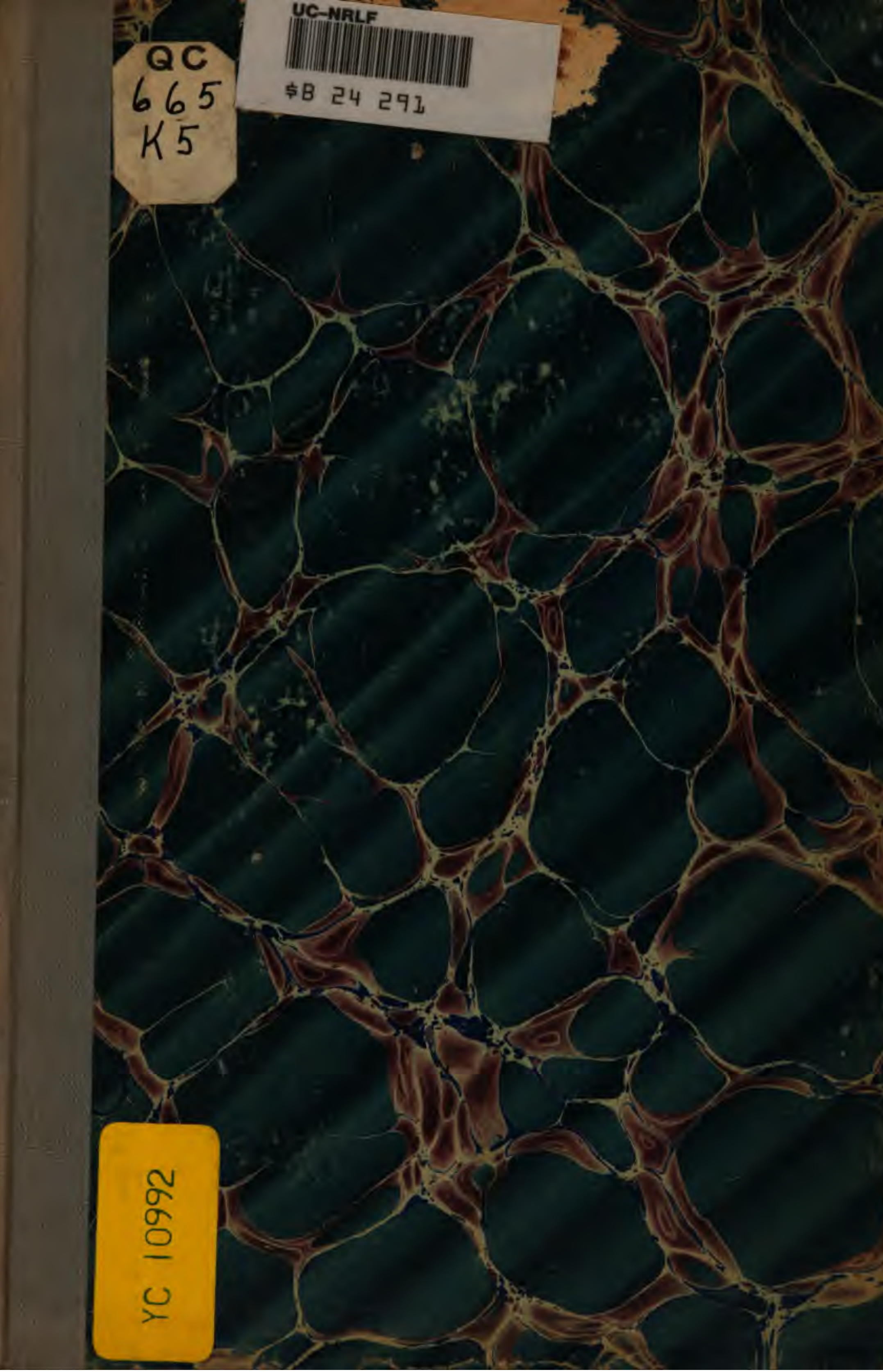
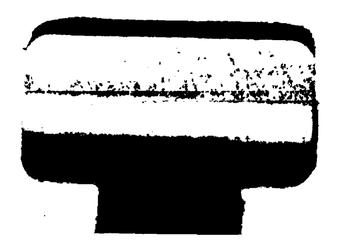



QC
665
K5
UC-NRLF
$B 24 291
YC 10992



ÜBER DIE ELEKTRISCHEN SCHWINGUNGEN EINES STABFÖRMIGEN LEITERS.

INAUGURAL-DISSERTATION

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FACULTÄT

DER

GROSSHERZOGLICHEN LANDESUNIVERSITÄT ZU GIESSEN

ZUR

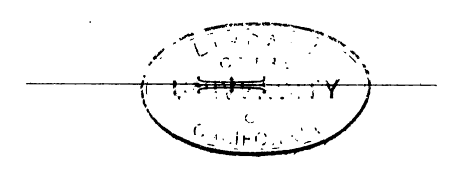
ERLANGUNG DER DOCTORWÜRDE

VORGELEGT

VON

FRANZ KIEBITZ

AUS BAUTZEN.



LEIPZIG,

JOHANN AMBROSIUS BARTH.

1901.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

UR

Inhalt.

Einleitung.

Oberschwingungen elektrischer Wellen, die sich längs Drähten fortpflanzen, sind von Drude[1]) nachgewiesen, von Lamotte[2]) genau gemessen und von Coolidge[3]) durch Leuchtwirkung der Drähte sichtbar gemacht worden. Auch schon die früher von Mazotto[4]) angestellten Versuche deuten auf die Existenz von Oberschwingungen hin.

Bei diesen Versuchen handelt es sich um elektrische Drahtwellen, wie sie durch die Blondlot'sche oder die Lecher'sche Versuchsanordnung hervorgerufen werden.

Es ist durchaus zu vermuten, dass auch die durch die Hertz'sche Anordnung in einem geradlinigen Erreger erzeugte Schwingung von Oberschwingungen begleitet ist, und zwar lässt sich bei einem stabförmigen Erreger das Gesetz ihrer Perioden ohne weiteres taxieren, da die Enden des Erregers stets Bäuche der Potentialschwingung sein müssen. Exact ist diese Aufgabe auf Grund der Maxwell'schen Differentialgleichungen des elektromagnetischen Wechselfeldes von Abraham[5]) gelöst worden.

Zweck der vorliegenden Untersuchungen ist es nun, diese Oberschwingungen eines Hertz'schen Erregers sowohl bei stabförmiger Gestalt als auch mit angehängten Capacitäten experimentell nachzuweisen, und sowohl ihre Periode als auch ihre Dämpfung zu untersuchen.

---

1) P. Drude, Abhandl. d. Kgl. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch. **23.** Nr. 2. 1896.

2) M. Lamotte, Wied. Ann. **65.** p. 92. 1898.

3) W. D. Coolidge, Wied. Ann. **67.** p. 578. 1899.

4) D. Mazotto, Nuovo Cimento (3) **36.** p. 189. 1894.

5) M. Abraham, Wied. Ann. **66.** p. 435. 1898.

Das Princip der Methode war dabei folgendes: In möglichst weiter Entfernung vom Erreger wurde eine Drahtleitung als Empfänger aufgestellt, deren Länge stetig verändert werden konnte. Bei einer bestimmten Länge des Empfängers war die Wirkung des Erregers auf denselben bei weitem die stärkste. Diese Länge entsprach der Resonanz des Empfängers mit der Grundschwingung des Erregers. Wenn nun die Empfängerlänge stetig verkleinert wurde, so nahm die Wirkung des Erregers auf den Empfänger nicht beständig ab, sondern es traten bei bestimmten Empfängerlängen wieder deutliche Maxima der Erregerwirkung auf. Diese Maxima werden von den Oberschwingungen des Erregers hervorgebracht.

Die Perioden der Erregerschwingung wurden aus der Resonanzlänge des Empfängers ermittelt, ihre Dämpfung aus der Steilheit der Resonanzcurven nach der Bjerknes'schen Methode.[1])

I. Apparate und Vorversuche.

Zur Ermittelung von Resonanzlängen wurde die Funkenwirkung im Empfänger benutzt.

1. Erreger.

Es wurden meist zwei geradlinige Erregerdrähte *e*, *e'* (Fig. 1) aus Kupfer angewendet, welche in einer Geraden lagen und nur durch eine sehr kleine, meist zwischen Messingkugeln liegende Funkenstrecke *f'* voneinander getrennt waren.

Zur Erregung diente ein grösseres Inductorium *J*, welches bei grösster Beanspruchung Funken bis zu 40 cm Länge in Luft lieferte; es wurde aber nur mit 10—16 Volt gespeist, sodass die Funkenstrecke zwischen Spitzen (mit Deprezunterbrecher) etwa 5—8 cm betrug. Die Secundärwickelung des Erregers wurde nun aber nicht direct mit den Erregerdrähten verbunden, sondern mit den Belegungen einer isolirt aufgestellten Leydener Flasche *F* von 28 cm Durchmesser, 30 cm Höhe des Stanniolbelages und $3\,^1/_2$ mm Glasdicke. Ausserdem waren die beiden Belegungen der Flasche mit einer zwischen Zinkelektroden liegenden Funkenstrecke *f* und der Primär-

---

1) V. Bjerknes, Wied. Ann. **44.** p. 74. 1891; **55.** p. 121. 1895.

wicklung eines in Petroleum liegenden Teslatransformators T verbunden. Die Secundärwicklung desselben (200 Windungen, Primärwicklung 12 Windungen) führt einerseits direct metallisch zu der Entladungskugel des einen Erregerdrahtes e, andererseits durch Zwischenschaltung einer kleinen Zuleitungsfunkenstrecke zu der Entladungskugel des anderen Erregerdrahtes e'.

Durch die Zwischenschaltung des Teslatransformators erhielt man viel intensivere Schwingungen als ohne denselben.

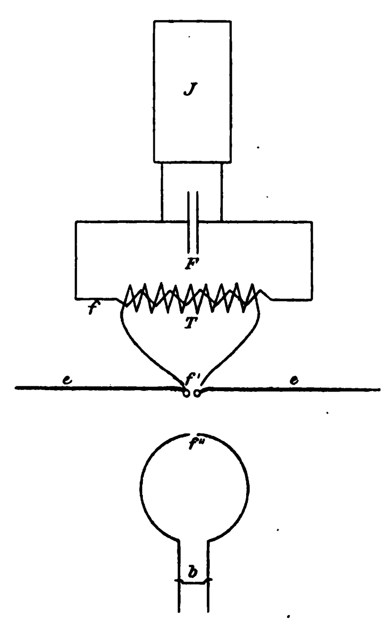


Fig. 1. Versuchsanordnung.

Ausserdem ist die Zwischenschaltung einer Zuführungsfunkenstrecke sehr wichtig (vgl. weiter unten p. 38).

Diese lag, ebenso wie die Erregerfunkenstrecke f', in einem Petroleumbade, was durch geringe Abwärtsbiegung der Erregerdrähte ermöglicht war. Diese Drähte lagen übrigens nur auf einer sehr kleinen Länge (etwa 5 cm) in der Nähe der Funkenstrecke im Petroleum. Zur Vermeidung elektrischer Seitenentladungen war der zur Zuleitungsfunkenstrecke führende Secundärdraht des Teslatransformators in eine Glasröhe gesteckt.

Es wurde zunächst ein Platinunterbrecher nach Deprez für das Inductorium benutzt.

Licht von f und f' war stets abgeblendet, weil es sonst die Beobachtung der secundären Funken erschwert hätte.

2. Empfänger.

Der Empfänger bestand aus einem horizontal liegenden, 2 mm starken Kupferdrahte, der im wesentlichen Kreisgestalt hatte und durch eine Funkenstrecke f'' unterbrochen war. Gegenüber derselben lief der Kreis in zwei durch eine bewegliche Drahtbrücke b verbundene Paralleldrähte aus (vgl. Fig. 1), sodass durch Verschieben von b die Länge des Empfängers innerhalb gewisser Grenzen stetig variirt werden konnte.

Die Secundärfunkenstrecke wurde entweder durch die sehr fein zugespitzten, auf weniger als 1 mm einander genäherter Drahtenden des Empfängers gebildet, oder diese Enden wurden zu einem Righi'schen Indicator[1]) oder zu den Glimmelektroden einer Zehnder'schen Röhre[2]) geführt.

Die Secundärfunkenstrecke f'' darf nicht in die Brücke b eingeschaltet werden, sondern muss ihr gegenüber liegen, da die Capacität der über b herausragenden Drähte des Empfängers für seine Schwingungsperiode nur dann unwesentlich ist, wenn sie dicht am Knoten der Potentialschwankungen liegt, d. h. der Funkenstrecke (dem Bauche der Potentialschwankungen) gerade gegenüber.

Aus diesem Grunde, d. h. damit die Enden der Drähte nicht störten, empfahl es sich, die Brücke möglichst kurz zu nehmen. Ihre Länge war bei den Versuchen höchstens $^1/_{10}$ der Empfängerlänge.

3. Resonanz eines Plattenerregers.

Einige Vorversuche wurden angestellt, bei denen Wellen ausgesandt wurden von einem Erreger, dessen 56 cm lange,

1) Ein versilberter Glasstreifen, in dessen Versilberung eine sehr feine Trennungslinie gezogen ist. Zum Teil wurde auch statt der Versilberung Stanniolbelag auf Glimmer verwendet.

2) Darunter verstehe ich die beiden auf geringe Distanz (unter $^1/_2$ mm) genäherten Elektroden einer Zehnder'schen Vacuumröhre.

6 mm dicke Messingdrähte angeschraubt waren an zwei 1 mm dicke quadratische Zinkplatten von 30 cm Seitenlänge, die in einer Ebene orientirt waren. An der Erregerfunkenstrecke trugen die Drähte Messingkugeln von 26 mm Durchmesser.

Dieser Erreger wurde zunächst ohne Teslatransformator durch ein mit 8 Volt gespeistes Inductorium getrieben, und die Wellen wurden durch den oben beschriebenen Empfänger aufgefangen, zur Controle auch noch mit kreisförmigen Drähten, deren Länge dadurch veränderlich gemacht worden war, dass sich Teile derselben übereinander schieben liessen. Das Ansprechen des Empfängers wurde nur durch die Funkenmethoden und durch Zehnder'sche Röhren beobachtet. Für jeden Empfänger gab es zunächst in der Nähe des Erregers ein Gebiet, in dem er stets ansprach, selbst wenn der Bügel *b* gar nicht auflag. Diese Erscheinung trat bei den sehr empfindlichen Righi'schen Streifen noch in einer Entfernung von $1\,^1/_2$ m ein. In sehr grossen Entfernungen — bei Righi'schen Streifen von 4 m ab — sprachen die Empfänger nie mehr an, und in der Mitte lag ein Gebiet, in dem das Ansprechen je nach der Lage des Bügels verschieden stark war.

Zu Resonanzversuchen wurde ein Empfänger verwendet, dessen Länge zwischen 225 und 270 cm verändert werden konnte, und zwar wurde er, da die Intensität der Funken schwer zu beurteilen war, innerhalb jenes zur Prüfung der Resonanz geeigneten Gebietes in eine so grosse Entfernung vom Erreger gerückt, dass die Empfängerlänge nur innerhalb kleiner Grenzen verändert werden konnte, ohne dass das Funkenspiel aufhörte.

Der Empfänger zeigte für maximale Wirkung (Resonanz) eine Länge von 249 cm. Das Centrum des Empfängers befand sich dabei auf der durch die Funkenstrecke f' senkrecht zum Erreger liegenden, horizontalen Geraden.

Ob man die Ebene des Empfängers senkrecht stellte, sodass er allein auf die elektrische Kraft ansprach, also parallel zum Erreger (Verbindungslinie von Funkenstrecke f'' und Centrum des Empfängers vertical), oder horizontal, sodass er allein auf die magnetische Kraft ansprach (Verbindungslinie der Funkenstrecke f'' mit dem Centrum des Empfängers parallel zum Erreger), erwies sich für die Messung der Resonanzlänge als

gleichgültig, nur war die Wirkung der elektrischen Kraft bedeutend schwächer, und es wurde aus diesem Grunde wie auch aus Bequemlichkeitsrücksichten der Empfänger stets in der auf die magnetische Kraft reagirenden Lage aufgestellt. Die Funkenstrecke f'' war stets dem Erreger zugewandt.

Diese Stellung ist auch in Fig. 1 angedeutet; die Entfernung des Erregers vom Empfänger war aber in Wirklichkeit viel bedeutender, als die Figur es angiebt.

Eine eingehende Prüfung der Abhängigkeit der Insentität des Ansprechens von der Lage der Funkenstrecke des Empfängers ergab, dass bei horizontaler Lage der Ebene des Empfängers sich innerhalb der Grenzen der Beobachtungsgenauigkeit die Stärke des Ansprechens allein nach der Lage des geometrischen Mittelpunktes des Empfängerkreises richtet, das heisst ungeändert bleibt, wenn man denselben in der horizontalen Ebene um sein Centrum dreht. Dies ist verständlich, da die magnetische Kraft eine grössere Wirkung ergab als die elektrische.

4. Geradliniger Erreger.

Der Erreger wurde nunmehr geradlinig gewählt, d. h. ohne angehängte Platten, und zwar von solcher Länge — 250 cm — dass für ihn die Resonanzlänge des Empfängers dieselbe war wie vorhin, nämlich 249 cm.

Er bestand aus zwei 5 mm starken Kupferdrähten, deren flach umgebogene Enden 11,3 mm dicke Messingkugeln trugen und in Petroleum lagen.

Für diesen Erreger liess sich eine Oberschwingung zeigen mit einem Empfänger, dessen Länge zwischen 78 und 92 cm veränderlich war, und zwar ergab sich als der wahrscheinlichste Wert für die Resonanzlänge 84 cm, also ziemlich genau der dritte Teil der Resonanzlänge, welche der Grundschwingung des Erregers entsprach. Diese Länge wurde mit verschiedenen Empfängern in Abständen[1]) von 30 bis 50 cm festgestellt.

Der Versuch, die Oberschwingung dadurch zu verstärken, dass man die Secundärdrähte des Inductoriums nicht direct

---

1) Abstand gerechnet von der primären Funkenstrecke f' zur secundären f'', d. h. die kürzeste Distanz zwischen Erreger und Empfänger.

hinter den Kugeln der Erregerdrähte anlegte, sondern an anderen Stellen, namentlich in $\frac{2}{3} . 249 = 166$ cm Entfernung von der Funkenstrecke, erwies sich als keine wesentliche Verbesserung, weder wenn man die Zuführung direct durch Leitung noch durch kleine Funkenstrecken ausführte.

Hingegen liess sich sehr deutlich zeigen, dass ein Empfänger, der auf die erste Oberschwingung abgestimmt war, und in der in Fig. 1 gezeichneten Lage ansprach, schwächer wirkte, wenn er den Erregerdrähten parallel verschoben wurde, und vielleicht überhaupt nicht mehr ansprach; bei weiterem Verschieben aber sprach er in 1,5 bis 2 m Entfernung von der Symmetrielinie des Erregers wiederum sehr deutlich an, eine neue Thatsache, die, wie weiter unten näher ausgeführt werden wird, ebenfalls das Vorhandensein der Oberschwingung beweist.

II. Wellenlängen von Grund- und Oberschwingungen beim stabförmigen Erreger.

1. Grundschwingung.

Nach diesen vorbereitenden Versuchen wurde derselbe geradlinige Erreger von 250 cm Länge mit dem Teslastrom gespeist, und zunächst die Grundschwingung möglichst genau bestimmt.

Es ergab sich, wenn als Indicator beim Empfänger eine Zehnder'sche Röhre, Funken zwischen Spitzen und Righi'sche Streifen (vgl. p. 8, Anm. 1) benutzt wurden, eine Resonanzlänge des Empfängers von 248 cm. Die Distanz zwischen der primären und der secundären Funkenstrecke variirte dabei von 1,5 m (bei den am wenigsten empfindlichen Indicatoren) bis zu 4 m (bei der Verwendung von Righi'schen Streifen.

2. Oberschwingungen.

Die Bestimmung von Oberschwingungen gelang auch hier zunächst nur für die erste. Erst als störende Büschelentladungen, die sich an den freien Enden der Erregerdrähte zeigten, durch sorgfältiges Abrunden derselben möglichst verkleinert und dann durch Anschmelzen kleiner Siegellackkuppen ganz beseitigt worden waren, gelang es, weitere Oberschwin-

gungen durch geeignet dimensionirte Resonatoren von der angegebenen Form nachzuweisen.

Es ergab sich deutlichste Resonanz bei 83, 50,5 und 36,5 cm Länge des Empfängerdrahtes. Diese Längen sind fast genau ungeradzahlige Teile der Resonanzlänge der Grundschwingung; denn es ist:

248 : 3 = 82,7,	beobachtet ist: 83,0,
248 : 5 = 49,6,	„ „ 50,5,
248 : 7 = 35,4,	„ „ 36,5.

Die Existenz weiterer harmonischer Oberschwingungen von ungeradzahliger Ordnung wurde in folgender Weise nachgewiesen.

Es wurden Kreise als Empfänger hergestellt aus $^1/_2$ mm starkem Kupferdraht, welche eine winzige, bei allen möglichst gleich grosse Funkenstrecke zwischen äusserst fein gefeilten, spitzen Drahtenden enthielten[1]; die Längen dieser Kreise betrugen genau $248/h$ cm für $h = 8$ bis 21. Der Empfänger von der Länge 248/8 wurde in 45 cm Abstand vom Erreger aufgestellt, wo auch infolge von elektrostatischer Influenz nie mehr secundäre Funken erregt wurden. Dann wurde genau an seine Stelle der nächst kleinere Empfänger von der Länge 248/9 gestellt, der dann sofort sehr deutlich auf die vierte Oberschwingung ansprach. Etwas näher wurde dann der Empfänger von der Länge 248/10 aufgestellt, doch weit genug, damit er nicht erregt wurde; an derselben Stelle sprach aber der kleinere Empfänger von der Länge 248/11 lebhaft an. Dieses Verfahren wurde fortgesetzt, und es gelang, noch für den Empfänger von der Länge 248/17 eine Stelle aufzufinden, an welcher er deutlich ansprach, ohne dass daselbst eine Einwirkung auf den grösseren, 248/16 cm langen Empfänger zu bemerken gewesen wäre.

Dabei war es aber nötig geworden, bis auf 4 cm an den Erreger heran zu gehen, und von nun an gelang mit den noch kleineren Resonatoren der Nachweis weiterer Oberschwingungen

1) Die Anwendung Righi'scher Streifen, die noch grössere Empfindlichkeit geboten hätten, wäre nicht günstig gewesen, weil bei der kurzen Länge der Resonatoren störende Reflexionen der Berührungsstelle des Resonators mit dem Righi'schen Streifen zu befürchten gewesen wären.

wegen ihrer geringen Intensität nicht mehr; doch dürfte das Vorhandensein noch beliebig vieler kleinerer Oberschwingungen ausser Frage stehen, nachdem dieselben bis zur achten nachgewiesen wurden, und es wurde darauf verzichtet, durch weitere Verfeinerung der Instrumente Oberschwingungen von noch höherer Ordnungszahl sichtbar zu machen.

Da die Resonatorenden nur sehr geringe Capacität besitzen, so ist die Resonanzlänge annähernd gleich der halben Wellenlänge der ihn erregenden Schwingung.

Durch diese Versuche ist also nachgewiesen, dass ein stabförmiger Erreger zahlreiche (8) harmonische Oberschwingungen ungeradzahliger Ordnung besitzt.

3. Energieverteilung der magnetischen Kraft.

Die Erscheinung des abwechselnden Aufleuchtens und Verlöschens eines abgestimmten Resonators, der parallel zu den Erregerdrähten in geeigneter Entfernung verschoben wird, liess sich hier noch bei dem auf die dritte ungeradzahlige Oberschwingung abgestimmten Empfänger deutlich erkennen; aber hier war schon der Streifen zwischen dem Gebiete, in dem der Empfänger schon durch elektrostatische Wirkungen beeinflusst wird, und dem, in welchem er überhaupt nicht mehr anspricht, nur 6 cm breit. Für noch kleinere Wellen wird er zu schmal, als dass die Erscheinung überzeugend dargethan werden könnte.

4. Knotenlinien der ersten Oberschwingung.

Für den Fall der ersten Oberschwingung wurde die soeben besprochene Erscheinung genauer untersucht und zu einer Prüfung der von Abraham berechneten Knotenlinien benutzt.

Zu dem Zwecke wurden mit Hülfe eines Resonators von 83 cm Länge in einem Quadranten der horizontalen Meridianebene der Erregerdrähte (vgl. Fig. 2) alle diejenigen Lagen des Centrums der vom Resonator umgrenzten Fläche aufgesucht, in denen der Resonator regelmässig ansprach, aus denen er jedoch nicht in der Richtung vom Erreger fort verschoben werden konnte, ohne dass das Ansprechen aufhörte.

Drehung der Resonatorfläche in sich um ihr Centrum erwies sich dabei ohne Einfluss, abgesehen von den in der

Verlängerung der Erregerdrähte liegenden Stellen. Dort wurde die Funkenstrecke den Erregerenden zugewandt, sodass auch hier nur die magnetische Kraft des Resonators wirkte.

Auf diese Weise musste die Verbindungslinie der Mittelpunkte der Resonatorfläche in allen diesen Lagen eine Curve gleicher Intensität der magnetischen Kraft der Oberschwingung ergeben, und durch die Aufnahme derartiger Curven mit 83 cm langen Resonatoren von verschieden grosser Empfindlichkeit des Indicators musste ein Bild von der Energieverteilung der magnetischen Kraft in der Umgebung des Erregers entstehen.

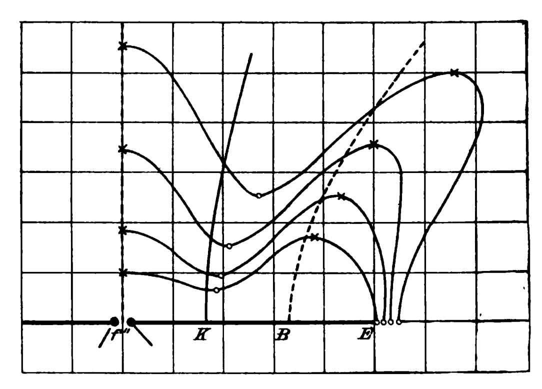


Fig. 2. Curven gleicher Energie der 1. Oberschwingung. Maassstab 1 : 35.

Derartige Curven wurden beobachtet und sind in der Fig. 2 schwach gezeichnet. Auf ihnen sind durch Punkte (o) die Stellen kürzesten Abstandes vom Erreger markirt. Ihre Verbindungslinie ergiebt den Schnitt einer Knotenfläche der magnetischen Kraft mit einer Meridianebene des Erregers (Knotenlinie).

Diese Knotenlinie fällt annähernd zusammen mit der von Abraham berechneten Knotenlinie (in der Fig. 2 stark gezeichnet), welche nach seiner Berechnung eine Hyperbel sein soll, die die Stabenden *E* als Brennpunkte besitzt, und deren Scheitel *K* um $^1/_3$ der Erregerlänge von den Erregerenden entfernt sind. Allerdings ist eine bestimmte Abweichung der theoretischen Knotenlinie von der beobachteten vorhanden. Diese Abweichung kann aber nicht daher rühren, dass unser Erreger eine endliche Dicke hat, während die Rechnung

Abraham's die Erregerdicke zunächst vernachlässigt; denn für die Correction, die bei der Berücksichtigung der Stabdicke an der Längeneinheit des Leiters anzubringen ist, berechnet Abraham den Wert

$$\frac{4{,}8 + 2 \operatorname{lognat} n}{n} \varepsilon^2,$$

wobei n die Ordnungszahl der Oberschwingung ist (im vorliegenden Falle also 3), und ε die Grösse

$$\varepsilon = \frac{1}{4 \operatorname{lognat} \alpha};$$

α ist das Verhältnis der Länge der Erregerdrähte zum Radius ihres Querschnittes; in unserem Falle ist also:

$$\varepsilon = \frac{1}{4 \operatorname{lognat} \frac{250}{0{,}25}} = \frac{1}{27{,}631}.$$

Demnach wäre jeder einzelne Erregerdraht von 125 cm Länge zu verlängern um den Betrag:

$$125 \cdot \frac{4{,}8 + 2 \operatorname{lognat} 3}{3} \cdot \varepsilon^2 = 0{,}4 \text{ cm}.$$

Wenn man diese Correction anbringt, so erhält man eine Hyperbel, die von der in der Figur gezeichneten so wenig abweicht, dass sie nicht deutlich von dieser getrennt eingetragen werden könnte. Sie ist sogar noch etwas steiler als die benutzte Hyperbel, sodass sie von der beobachteten Knotenlinie noch etwas stärker abweicht.

Wie die Knotenlinien lassen sich auch die Bauchlinien der magnetischen Kraft discutiren. Abraham bestimmt die Punkte einer Meridianebene des stabförmigen Erregers durch eine Schar confocaler Kegelschnitte, deren gemeinschaftliche Brennpunkte die Enden der Erregerdrähte sind. Ist der Parameter x die grosse Halbaxe einer Ellipse, y die reelle Halbaxe einer Hyperbel der Schar, so stellt sich die magnetische Kraft in einem Punkte (x, y) nach Abraham dar als eine Function von der Form:

$$N = X(x) \,.\, Y(y).$$

Auf einer Curve x liegen Extremwerte von N in denjenigen Punkten $y = y_0$, deren Hyperbelkoordinaten y_0 die Gleichung

$\partial N / \partial y = 0$ erfüllen. Diese Gleichung reducirt sich aber auf die von x freie Gleichung

$$\frac{dY}{dy} = 0;$$

d. h. die Knoten- und die Bauchlinien sind Hyperbeln $y = y_0$, deren Halbaxen y_0 die Wurzeln der Gleichung $dY/dy = 0$ sind.

Die Function Y hat eine sehr complicirte Gestalt, sodass es grosse Schwierigkeiten bereiten würde, die Gleichung $dY/dy = 0$ exact aufzulösen.

Man kann aber leicht an den Erregerdrähten Punkte B angeben, in denen die magnetische Kraft Extremwerte besitzt; die Hyperbeln der Schar, welche diese Punkte enthalten, sind dann die gesuchten Knoten- und Bauchlinien.

Abraham berechnet nämlich, dass längs des stabförmigen Erregers von der Länge 1 die magnetische Kraft der n^{ten} Oberschwingung (für die Grundschwingung ist die Ordnungszahl $n = 1$) proportional ist mit $\cos^2 (\frac{1}{2} \pi n y)$; sie hat also Bäuche für:

$$\tfrac{1}{2} \pi n y = 0, \ \pi, \ 2\pi, \ldots$$

$$y = 0, \ \frac{2}{n}, \ \frac{4}{n}, \ldots$$

In unserem Falle ist $n = 3$. In der Umgebung des 250 cm langen Erregers sind also die Bauchlinien Hyperbeln mit den Halbaxen $0, \ 250 \cdot \frac{2}{3}, \ 250 \cdot \frac{4}{3}, \ldots$, deren Brennpunkte die Enden der Erregerdrähte sind.

Von diesen Hyperbeln sind die beiden ersten reell und in der Fig. 2 punktirt gezeichnet.

Die Punkte grösster Entfernung der Erregerdrähte von den experimentell gefundenen Curven gleicher magnetischer Energie der ersten ungeradzahligen Oberschwingung sind in der Figur durch das Zeichen $\times$ gekennzeichnet; ihre Verbindungslinie ergiebt die experimentell bestimmten Bauchlinien. Man sieht, dass dieselben in ähnlicher Weise von den theoretischen Bauchlinien abweichen wie die experimentell gefundenen Knotenlinien von den theoretischen.

Ob die Abweichung durch störende elektrostatische Wirkung zu erklären ist oder dadurch, dass man mit dem Empfänger von 5,5 qdm Flächeninhalt einen gewissen Integralwert der

magnetischen Kraft beobachtet und nicht genau ihre Intensität im Mittelpunkte des Resonatorkreises, das steht dahin.

Jedenfalls enthält die Form dieser Verteilungscurven in der Umgebung des Erregers einen neuen Beweis für das Vorhandensein der Oberschwingung.

Die Verlängerung des Erregerdrahtes stellt sich, wie zu erwarten war, in genauer Uebereinstimmung mit der Theorie als Knotenlinie dar, ebenso die Mittelnormale auf dem Erregerdrahte als eine Bauchlinie.

5. Abhängigkeit der Energieverteilung von der Art der Erregung.

Die gleichen Beobachtungen wurden wiederholt für den Fall, dass der Teslastrom nicht in nächster Nähe der Funkenstrecke zugeleitet wurde, sondern durch Funken, welche in 166 cm Entfernung ($^1/_3$ Erregerlänge, Punkt *B* der Fig. 2) von derselben auf die Erregerdrähte übersprangen.

In diesem Falle ergaben sich ähnliche Curven wie die in der Fig. 2 dargestellten, doch war die Abweichung der die Punkte extremer Wirkung verbindenden Curven von den Hyperbeln Abraham's noch grösser als zuvor.

Durch zahlreiche Vergleiche mit den entsprechenden Wirkungen in der Umgebung des anderen Erregerdrahtes wurde übrigens erwiesen, dass dort die Erscheinung genau ebenso verläuft.

Das Vorhandensein ähnlicher Curven für Oberschwingungen höherer Ordnung ist zu augenscheinlich, als dass es nötig erscheinen konnte, dieselben auch noch durch mühsame Beobachtungen aufzusuchen.

Nur für einen auf die Grundschwingung abgestimmten Resonator wurde nachgewiesen, dass die Curven gleicher Intensität um so genauer Kreise mit der primären Funkenstrecke als Mittelpunkt sind, je grösser die Entfernung vom Erreger ist.

III. Verschieden geformte Erreger.

Das Gesetz der Oberschwingungen wird, wie vorauszusehen ist, ein ganz anderes, wenn die Erregerdrähte grosse Metallmassen tragen.

So wurde ein Erreger construirt, der aus zwei hohlen Messingkugeln von 20 cm Radius bestand, deren Oberflächen 76 cm voneinander entfernt waren; an jeder wurde ein 38 cm langer, 5 mm dicker Messingdraht befestigt, und zwischen den gut halbkugelig abgefeilten Enden dieser Drähte sprangen die Funken über.

Nun berechnet man für den Fall, dass die Capacitäten C einer solchen Anordnung nicht nachweisbar influencirend aufeinander einwirken, und dass die Drahtwiderstände klein sind, die Schwingungsdauer des ganzen Systems in der Form:

$$T = \pi . \sqrt{2\,L\,C},$$

wobei L der Coefficient der Selbstinduction ist. Die Capacitäten C sind dabei elektromagnetisch gemessen; misst man sie elektrostatisch, so erhält man aus dieser Gleichung für die Wellenlänge $\lambda = c . T$ der ausgesandten Schwingung die Formel:

$$\lambda = \pi . \sqrt{2\,C\,L}.$$

Für den Fall nun, dass der Radius R des Erregerdrahtes klein ist gegenüber seiner Länge l, berechnet Drude[1]) für den Selbstinductionscoefficienten L den Wert:

$$L = 2 . l . \log \frac{l}{R},$$

womit sich für die Wellenlänge folgender Ausdruck ergiebt:

$$\lambda = 2\pi . \sqrt{l . C . \log \frac{l}{R}}.$$

Im vorliegenden Falle war nun $l = 76$ cm, $C = 20$ cm, $R = \frac{1}{4}$ cm, und daraus ergiebt sich für $\lambda/2$ der Wert 385 cm.

Obgleich nun mit sehr verschieden empfindlichen Resonatoren in den verschiedensten Entfernungen (2—4 m) beobachtet wurde, konnte doch nie eine deutliche Resonanzlage bei Längen des Empfängerdrahtes zwischen $4^1/_2$ und 1 m beobachtet werden. Das Einzige, was sich mit einiger Sicherheit ergab, waren Minima des Ansprechens bei 4 m und bei $2^1/_2$ m, sowie ein weiteres Minimum bei 90 cm Drahtlänge.

Die erste einigermaassen scharfe Resonanz lag bei 80 cm Länge des Empfängers. Ferner traten, im Gegensatze zu der

1) P. Drude, Physik des Aethers, p. 396.

ausserordentlich verschwommenen Grundschwingung sehr scharfe Resonanzen hervor bei 60, 49 und 38 cm Länge des Empfängerdrahtes, die von allerdings nicht harmonischen Oberschwingungen herrührten.

Der bei den Vorversuchen beschriebene Erreger mit den Zinkplatten zeigte ausser der dort beobachteten Grundschwingung des ganzen Systems Oberschwingungen mit halben Wellenlängen von

108, 51 und 34 cm.

Die Harmonie der Oberschwingungen wurde noch schlechter, als ein längerer geradliniger Erregerdraht angewendet wurde, der 5 mm dick und 240 cm lang war und an seinen Enden dieselben Platten trug. Nach der obigen Formel ist die Wellenlänge der von der Gesamtanordnung ausgehenden Grundschwingung:

$$\lambda = 2\pi \,.\, \sqrt{l \,.\, C \,.\, \log \frac{l}{R}} \,.$$

C ist nicht bekannt; doch kann man näherungsweise annehmen, dass es ebenso gross ist wie in der vorhergehenden Anordnung mit der Wellenlänge $\lambda_0 / 2 = 248$ cm, dem Plattenabstande $l_0 = 112$ cm und dem Halbmesser des Drahtquerschnittes $R_0 = 0{,}3$ cm; dann gilt die Gleichung:

$$\lambda_0 = 2\,\pi \,.\, \sqrt{l_0 \,.\, C \,.\, \log \frac{l_0}{R_0}} \,,$$

und man erhält durch Elimination von C aus beiden Gleichungen:

$$\lambda = \lambda_0 \,.\, \sqrt{\frac{l}{l_0} \,.\, \frac{\log \frac{l}{R}}{\log \frac{l_0}{R_0}}} \,.$$

Hieraus berechnet man für den vorliegenden Fall, wo $l = 240$ cm und $R = \frac{1}{4}$ cm ist, $\lambda / 2 = 391$ cm. Aus den in 4 m Abstand vorgenommenen Beobachtungen ergab sich die beste Resonanz zwischen 384 und 390 cm.

Die Abweichung von dem berechneten Werte ist wohl erklärlich dadurch, dass die Capacität der 28 mm dicken Kugeln vernachlässigt worden ist, zwischen denen die Funken bei der die Grundschwingung 2 . 248 cm erregenden Anordnung übersprangen.

Die ganz unharmonischen Oberschwingungen des Erregers mit der 384—390 cm langen Grundschwingung wurden festgestellt durch Resonanz mit Empfängern von der Länge 238 bis 240 cm, 112, 86 und 71 cm.

IV. Dämpfung von Grund- und Oberschwingung.

1. Beobachtungsmethode.

Zur Messung der Dämpfung der Schwingungen wurde die Methode von Bjerknes benutzt, die darin besteht[1]), die Resonanzcurven aufzunehmen, die man erhält, wenn man die Länge verschiedener Empfängerdrähte als Abscissen, die zugehörige Intensität (Energie) der elektrischen Schwingung im Resonator als Ordinate aufträgt.

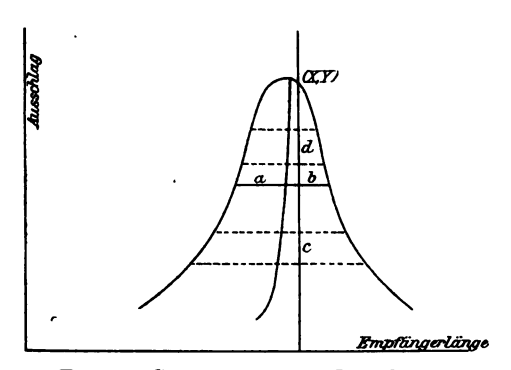


Fig. 3. Construction von Bjerknes.

Aus diesen Resonanzcurven wird die Wellenlänge der Schwingung und ihre Dämpfung durch die folgende von Bjerknes angegebene geometrische Construction gefunden:

Man zeichnet (Fig. 3) in der experimentell gefundenen Curve eine Anzahl Sehnen parallel der Abscissenaxe und sucht die Mittelpunkte dieser Sehnen. Diese Mittelpunkte bestimmen eine gleichseitige Hyperbel, deren Asymptote man construirt. Diese Asymptote schneidet die Resonanzcurve im Isochronitätspunkte. Die Abscisse dieses Punktes ist die Isochronitätslänge des Empfängers X, die Ordinate sei Y. Man misst nun die vier Segmente a, b, c, d ab, worin sich Y und

1) V. Bjerknes, Wied. Ann. 55. p. 151. 1896.

eine beliebige Sehne teilen, und bestimmt den Mittelwert der logarithmischen Decremente von Erreger und Empfänger nach der Formel:

$$\omega = \frac{\pi}{x} \cdot \sqrt{\frac{a\,b\,c}{d}}.$$

ω ist dabei das arithmetische Mittel aus den logarithmischen Decrementen des Erregers und des Empfängers.

Das logarithmische Decrement γ einer elektrischen Schwingung von der Periode x ist dabei durch die Annahme definirt, dass das Potential φ eine periodische Function der Zeit t von der folgenden Form ist:

$$\varphi = e^{-\frac{\gamma t}{x}} \cdot \left(A \,.\, \sin \frac{2\pi t}{x} + B \,.\, \cos \frac{2\pi t}{x} \right).$$

Voraussetzung bei der Bjerknes'schen Methode ist, dass die elektrischen Schwingungen Sinusform haben und ein constantes logarithmisches Decrement besitzen. Die Methode ist nur anwendbar, wenn die Resonanzcurve genügend steil ist, das Decrement also keinen zu grossen Wert hat. Bjerknes findet, dass seine Construction brauchbar ist, solange das mittlere Decrement ω den Wert 1 nicht übersteigt.

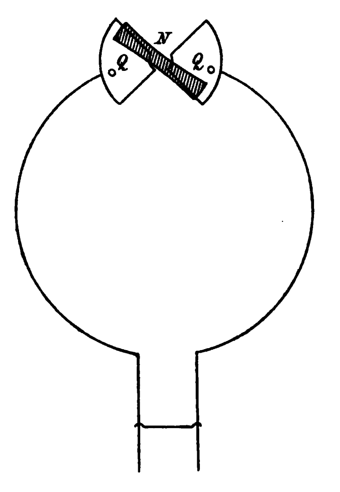


Fig. 4. Quadrantelektrometer.

Da nach Bjerknes das Decrement der Schwingung merklich von der Grösse der Funkenstrecke abhängt, so wurde der Erreger möglichst stabil aufgestellt, damit immer mit constanter Funkenstrecke gearbeitet wurde. Als Erreger wurde der stabförmige Erreger von 250 cm Gesamtlänge und 5 mm Dicke benutzt.

Die Intensität der elektrischen Wellen im Resonator ist nur sehr schwer durch Funkenmethoden zu messen. Es wurde daher wie bei Bjerknes zunächst ein kleines Elektrometer (vgl. Fig. 4) verwendet. Dieses bestand aus zwei Messingquadranten Q von 1,5 mm Dicke und 15 mm Radius, welche

horizontal lagen und von je einem 12 mm langen und 2 mm dicken Messingdrahte getragen wurden, der in senkrechter Richtung isolirt durch den Boden des Elektrometergehäuses geführt war. Die herausragenden Enden dieser Drähte waren zur Vermeidung von Contactwiderständen amalgamirt, und an sie wurden die gleichfalls amalgamirten Enden des Empfängerdrahtes von der in der Figur gezeichneten und auch oben beschriebenen Form angelegt. Ueber diesen Quadraten schwebte eine 28 mm lange Nadel aus dünnem Aluminiumblech; ihre Form ist aus der Figur ersichtlich. Diese Nadel *N* war zunächst an einem 4 cm langen Coconfaden drehbar aufgehängt und wurde durch die wechselnde entgegengesetzte Ladung der Enden des Erregerdrahtes von den Quadranten angezogen. Diese Anziehung wurde in der üblichen Weise durch Spiegelablesung gemessen.

Das Elektrometer ist um so empfindlicher, je näher die Nadel den Quadranten ist. Für die vorliegenden Beobachtungen zeigte sich die Empfindlichkeit geeignet, die man erhielt, wenn die Nadel in 2 mm Höhe über den Quadranten schwebte, und ihre Axe mit der Verbindungslinie der Mitten der Quadranten Winkel von 30—45^0 bildete. Die Schwingungsdauer der Nadel betrug 3,6 Secunden.

Bei sämtlichen Elektrometerbeobachtungen, von denen die Rede sein wird, war die Aufstellung die in Fig. 1 gezeichnete. Das Elektrometer war stets dem Erreger zugewandt.

Unter Entfernungen zwischen Erreger und Empfänger sind stets die Abstände des Elektrometers von der primären Funkenstrecke verstanden.

Bei den Beobachtungen wurde zunächst der Erregerstrom so lange geschlossen, bis die ersten drei oder fünf Umkehrpunkte der schwingenden Nadel abgelesen waren. Diese Schwingungen wurden bei längerem Schliessen des Stromes sehr unregelmässig, und es war darum mühsam, genaue Beobachtungen auszuführen.

Doch liess sich bereits mit einem so vorgerichteten Elektrometer deutlich erkennen, dass Resonanz vorhanden war bei einer Empfängerlänge von etwa 230 und 60 cm, während früher für denselben Erreger ohne Elektrometer (vgl. oben p. 12) 248 und 83 cm als Resonanzlänge des Empfängers gefunden

worden war. Der Grund hierfür ist offenbar in der Capacität des angelegten Elektrometers zu suchen.

Genauere Messungen, wie sie zur Bestimmung des logarithmischen Decrementes notwendig sind, liessen sich mit dieser Vorrichtung darum nicht ausführen, weil der Coconfaden die Ruhelage nicht genau genug einhielt, und er wurde darum durch einen 4 cm langen, sehr feinen Quarzfaden ersetzt.

Mit dieser Verbesserung wahrte das Elektrometer seine Ruhelage sehr gut, und es gelang, Resonanz bei 238 cm Drahtlänge nachzuweisen; der Abstand zwischen Erreger und Empfänger war dabei 3 m, der grösste Ausschlag 21 mm und die Entfernung der Scala vom Spiegel $2^1/_2$ m.

Die Methode der Berechnung der Intensität der Resonatorwirkung aus den ersten Umkehrpunkten der Schwingungen der Elektrometernadel erwies sich jedoch als viel zu unsicher, als dass man darauf Bestimmungen von Resonanzcurven mit der nötigen Genauigkeit hätte gründen können. Nach vergeblichen Versuchen, eine constante Wirkung dadurch zu erreichen, dass man den primären Teslastrom durch einen Pendelunterbrecher immer nur für eine kleine, aber constante Zeit schloss, wurde darum die von Bjerknes verwendete Methode benutzt, bei der die Intensität der Wirkung allein durch den ersten Ausschlag der Elektrometernadel gemessen wird. Der Strom wurde nach der ersten Umkehr der Nadel unterbrochen.

Nun ist aber die Frage, ob der erste Ausschlag des Elektrometers proportional dem Zeitintegral der Energie der elektrischen Schwingungen im Resonator ist, weil davon die Anwendbarkeit der Bjerknes'schen Construction abhängt. Man kann dies dadurch prüfen, dass man zusieht, ob bei constanter Potentialdifferenz der Quadranten des Elektrometers der erste Ausschlag der Nadel proportional dem Quadrat dieser Potentialdifferenz ist. Darüber geben die nachstehenden Beobachtungen Aufschluss:

An die Quadranten wurden folgende durch Accumulatoren erzeugte Spannungen V gelegt:

$$V = 4,\ 6,\ 10,\ 16,\ 72 \text{ Volt.}$$

Die zugehörigen Ausschläge betrugen:

$$a = 2,\ 3,\ 7,\ 18,\ 146 \text{ mm.}$$

Das Verhältnis V^2/a ist nicht constant, sondern besitzt die folgenden beständig zunehmenden Werte:

$$\frac{V^2}{a} = 8,\ 12,\ 14,\ 14,\ 36.$$

V^2/a ist also nur innerhalb eines kleinen Intervalles von Potentialdifferenzen (6—16 Volt) annähernd constant.

Um trotz dieses Umstandes die Methode von Bjerknes mit einiger Genauigkeit anwenden zu können, musste es zweckmässig erscheinen, die Resonanzcurve möglichst nur in sehr grosser Nähe der Resonanzstelle zu benutzen, um nur kleine Intervalle von Potentialdifferenzen zu verwerten.

Die so benutzten Elektrometerausschläge liegen in dem Gebiete (25—40 mm), in welchem annähernde Proportionalität zwischen dem ersten Ausschlag und dem Quadrat der Potentialdifferenz nach der obigen Beobachtung besteht.

Man erhält eine für die Construction geeignete Form der Resonanzcurve, wenn man als Einheit der Länge des Empfängerdrahtes (der Abscissen in der Figur) nicht etwa 1 cm wählt, sondern die Resonanzlänge, und als Einheit der Ausschläge (der Ordinaten) den Ausschlag bei grösster Resonanz.

2. Ergebnisse mit dem Quadrantelektrometer.

Von den Beobachtungen, die mit dieser Anordnung ausgeführt wurden, ergaben die besten für das mittlere Decrement der Grundschwingung den Wert 0,41; dabei war die Resonanzcurve in 2 m Entfernung zwischen Erreger und Empfänger beobachtet worden, und die stärkste Resonanz bei 236 cm Drahtlänge vorhanden. Auf die erste Oberschwingung sprach der Resonator bei 65 cm Länge am deutlichsten an (Entfernung 55 cm), und die Resonanzcurve ergab für das logarithmische Decrement den Wert 0,5. Für die nächste Oberschwingung liess sich die Stelle der grössten Resonanz bei 54 cm bestimmen; eine zur Berechnung der Dämpfung geeignete Curve war aber nicht aufzustellen.

Die Beobachtungen mit dem benutzten Elektrometer waren dadurch ausserordentlich erschwert, dass sich die Nadel sehr oft dauernd elektrisirte und dann ihre Ruhelage verlegte. Wenn dieses eintrat, musste die Nadel durch Berührung entladen werden, und da bei der äusserst zarten Construction

dieses feinen Elektrometers geringe Stösse sehr schädlich waren, so war auch bei den durch das Oeffnen des Gehäuses hervorgerufenen Erschütterungen eine Aenderung der Empfindlichkeit des Instrumentes oft nicht zu vermeiden, und dann musste die Beobachtungsreihe abgebrochen werden. Ausserdem kamen sehr grosse Unregelmässigkeiten vor, die nur durch elektrostatische Influenz der Erregerdrähte zu erklären waren. Man konnte diese Influenzwirkung nachweisen, wenn man die Erregerdrähte so weit voneinander entfernte, dass keine Funkenbildung mehr zu stande kam.

Durch genaue Einstellung des Elektrometers in die Symmetrieebene des Erregers (Aequatorebene) konnte zwar dieser Einfluss eliminirt werden. Da jedoch diese Einstellung mit genügender Genauigkeit nur durch den Versuch mit auseinander gezogenen Erregerdrähten ermittelt werden konnte, während doch die Funkenstrecke des Erregers immer dieselbe sein sollte (vgl. oben p. 21), so war dieses Einstellungsverfahren ausgeschlossen.

3. Einarmiges Elektrometer.

Es erschien daher zweckmässig, ein Elektrometer (von geringer Capacität) zu construiren, welches gestattet, elektrostatische Wirkungen sofort als solche zu erkennen, damit man geeignete Stellungen für das Elektrometer aufsuchen konnte, ohne am Erreger etwas verschieben zu müssen, und bei dem ausserdem Elektrisirung der Nadel von vornherein ausgeschlossen ist.

Ein solches Elektrometer wurde dadurch geschaffen, dass an der Unterbrechungsstelle des secundären Stromkreises das eine Drahtende die Form eines leicht und messbar beweglichen Armes erhielt, welcher von dem anderen, wohl abgerundeten Ende infolge der wechselnden entgegengesetzten Ladungen durch die Wirkung der elektrischen Wellen angezogen, infolge der gleichnamigen Elektrisirung durch elektrostatische Influenz der Erregerdrähte hingegen abgestossen wurde.

Diese abstossende Wirkung setzte immer etwas eher ein, als die der elektrischen Wellen, sodass, wenn der Empfänger nicht genau in der Aequatorebene des Erregers stand, man immer zunächst einen kleinen Anstoss nach der falschen Richtung beobachtete, ehe der Hauptausschlag erfolgte. Eine

dauernde Elektrisirung der mit dem Empfängerdrahte leitend verbundenen Nadel konnte natürlich nicht zu stande kommen.

Die freie Beweglichkeit des einen Endes des Empfängerdrahtes war dadurch hergestellt worden, dass in einem Gehäuse an einem 5 cm langen Quarzfaden (vgl. Fig. 5) ein 20 mm langes und 4 mm breites, sehr dünnes Kupferblättchen (Elektrometernadel) *N* so aufgehängt war, dass es nach seiner Länge horizontal, der Breite nach vertical schwebte. Zum Zwecke der Ablesung mit Scala und Fernrohr war dieses Blättchen mit einem sehr leichten Spiegel *S* starr verbunden. In der Verlängerung des Fadens war eine äusserst feine, 4 mm lange Kupferdrahtspitze *s* an die Nadel gelötet; diese berührte die Oberfläche eines Quecksilberkügelchens *Hg*, das auf dem breit geschlagenen, amalgamirten Ende eines geraden, horizontalen, 2 mm dicken Kupferdrahtes *D* von $7^1/_2$ cm Länge lag, der mit Siegellack in die Wand des Gehäuses gekittet war.

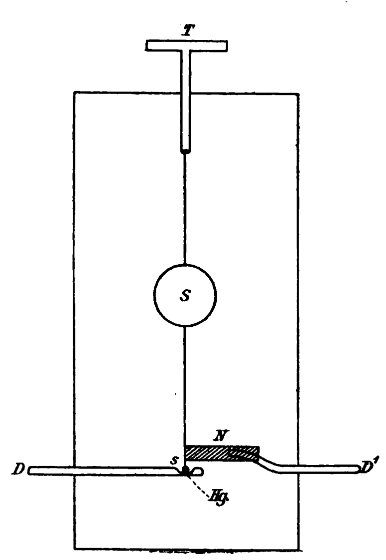


Fig. 5. Einarmiges Elektrometer.

Ein zweiter Kupferdraht *D'* von den gleichen Dimensionen war in die gegenüberliegende Wand gekittet und lag fast genau in der Verlängerung dieses Drahtes, sodass ein Zwischenraum von 1 cm zwischen beiden Drähten blieb; sein inneres Ende war um 4 mm aufwärts gebogen, sodass es genau in der Höhe der Nadel lag.

An die aus dem Gehäuse herausragenden Enden der Kupferdrähte wurden die Enden der oben (p. 8) beschriebenen Empfänger angelegt.

Das Elektrometer war um so empfindlicher, je näher die Nadel *N* dem inneren Ende des Drahtes *D'* war. Mit Hülfe eines Torsionskopfes *T* wurde sie so eingestellt, dass sie mit der Richtung der Drähte *D* und *D'* einen Winkel von 30°

bildete, sodass die Distanz zwischen dem inneren Ende von D' und der Nadel N etwa 4 mm betrug.

Dann lagen die beobachteten Ausschläge etwa zwischen 1 und 4 mm.

Wurden an dieses Elektrometer die Pole der Accumulatorenbatterie angelegt, so betrug der erste Ausschlag bei

$$V = 4,\ 6,\ 10,\ 12,\ 16,\ 72 \text{ Volt},$$

$$a = 0{,}1,\ 0{,}3,\ 0{,}9,\ 1{,}4,\ 2{,}5,\ 91 \text{ mm}.$$

Daraus ergiebt sich für $\frac{V^2}{a}$:

$$\frac{V^2}{a} = 160,\ 120,\ 111,\ 103,\ 101,\ 57.$$

Die ersten Ausschläge konnten also in dem benutzten Intervalle (1—4 mm) annähernd als proportional dem Quadrate der Potentialdifferenz angesehen werden (vgl. oben p. 23).

Die Schwingungsdauer der Nadel betrug nur 1,4 Secunden.

Es war ausserordentlich schwierig, die Elektrometernadel so einzustellen, dass die Spitze genau senkrecht unter dem Aufhängepunkte lag, auch musste peinlich auf völlige Reinheit der Quecksilberoberfläche geachtet werden, weil sonst leicht Verlegungen des Nullpunktes vorkamen und die Reibung zu stark wurde. Wenn aber einmal dieses Elektrometer fehlerfrei eingestellt war, so zeigte es neben sehr exacten Ausschlägen den grossen Vorteil, dass sich mit ihm lange und ausführliche Beobachtungsreihen ausführen liessen, ohne dass durch zufällige Störungen die Empfindlichkeit geändert wurde.

Darum war diese Construction dem empfindlicheren Quadrantelektrometer vorzuziehen.

4. Quecksilberunterbrecher.

Der Deprezunterbrecher versagte oft, wenn er längere Zeit im Gange war, und er wurde darum durch einen Quecksilberturbinenunterbrecher ersetzt, welcher die günstigste Wirkung ergab, wenn er 100 mal in einer Secunde den Strom öffnete.

Dieser Unterbrecher wurde bei allen folgenden Untersuchungen verwendet. Die mit dem Deprezunterbrecher und dem einarmigen Elektrometer gefundenen Ergebnisse können übergangen werden, weil die später gefundenen viel zuverlässiger und umfassender sind.

Der Turbinenunterbrecher musste auf einem isolirten Steinpfeiler auf Korkfüssen aufgestellt werden, weil er sonst das empfindliche Elektrometer zu heftig erschütterte, als dass sich genaue Beobachtungen hätten ausführen lassen.

Mit der so vorgerichteten Versuchsanordnung ist eine grosse Zahl von Resonanzcurven aufgenommen worden, die der 2,50 m lange Erreger mit den kreisförmigen, durch Bügelverschiebung in ihrer Länge veränderlichen Empfängern ergab.

5. Resonanzcurven.

Es wurden Resonanzcurven für die Grundschwingung und für die erste Oberschwingung bestimmt. Vor der Aufzeichnung derselben wurde an den Ausschlägen eine Correction angebracht, die dem Umstande Rechnung trug, dass sich beim Verschieben

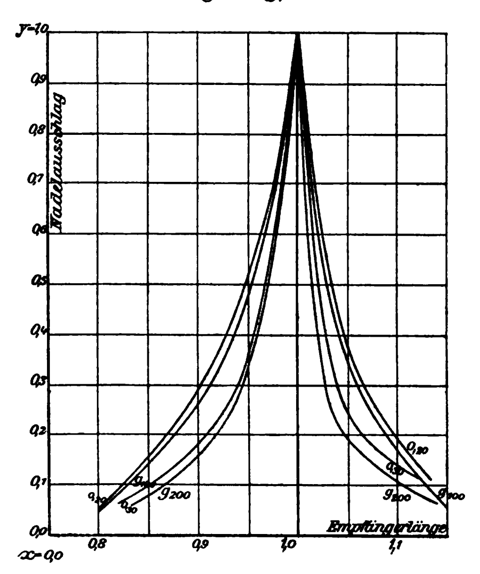


Fig. 6. Resonanzcurven.

des Bügels der Flächeninhalt des Resonators und damit die Zahl der von ihm geschnittenen Kraftlinien ändert.

Es ergab sich, dass die Resonanz um so schärfer war, je grösser der Abstand zwischen Erreger und Empfänger gewählt wurde. Für die besten Beobachtungen, die gelungen sind, stellt in der Fig. 6 die Curve g_{100} die Resonanz der Grund-

schwingung dar, welche in 100 cm Entfernung beobachtet wurde, g_{200} die in 200 cm Abstand gefundene. Die Curve 0_{20} giebt ein Bild der ersten Oberschwingung in 20 cm Abstand, die Curve 0_{30} dasselbe in 30 cm Abstand.

Grössere oder kleinere Abstände zu wählen, empfahl sich nicht, weil dann die Ausschläge zu klein bez. zu gross waren, als dass die Beobachtungen zur Aufstellung einer geeigneten Resonanzcurve hätten dienen können.

Die Wahl der Abscissen und Ordinaten der Resonanzcurve ist oben (p. 24) besprochen worden. In der Zeichnung sind übrigens sämtliche Abscisssen verdoppelt worden, da sich die sonst allzuspitzen Curven nicht gut zu einer graphischen Wiedergabe der Erscheinung eignen.

Aus der Fig. 6 ergiebt sich, dass *die Resonanzcurve um so steiler wird, je grösser die Entfernung zwischen Erreger und Empfänger ist, d. h. dass die mittlere Dämpfung vom Erreger und Empfänger um so bedeutender ist, je näher dieselben einander kommen.*

Dieses Resultat war zu erwarten wegen der gegenseitigen Beeinflussung beider Leitersysteme.

6. Rechnerische Resultate für den kreisförmigen Empfänger.

Jede zur Berechnung der Decremente benutzte Resonanzcurve wurde erhalten als Mittel aus drei bis fünf direct nacheinander bei unveränderter Versuchsanordnung aufgenommenen Beobachtungsreihen, die meistens bis auf wenige Procente untereinander übereinstimmten.

In der Resonanzcurve wurden die Mittelpunkte derjenigen zur Abscissenaxe parallelen Sehnen graphisch bestimmt, welche durch direct beobachtete Curvenpunkte gingen. Dann wurde die Asymptotenlage der gleichseitigen Hyperbel ermittelt, auf der sie nach Bjerknes liegen (vgl. p. 20).

Beispielsweise war für die Grundschwingung in 1,5 m Abstand die in Fig. 7 gezeichnete Resonanzcurve gefunden worden. Die direct beobachteten Punkte sind darin angegeben. Legt man durch dieselben zur Abscissenaxe parallele Sehnen, so erhält man Punkte (ξ, η), deren Abscissen ξ in der ersten, deren Ordinaten η in der zweiten Columne der Tab. 1 eingetragen sind. Diese Punkte sollen auf einer Hyperbel mit

den Asymptoten $y = 0$, $x = X$ liegen, wobei X die noch zu bestimmende Isochronitätslänge ist, d. h. die Coordinaten dieser Punkte sollen die folgende Gleichung erfüllen:

$$(\xi - X)\,\eta = a\,.$$

Hierin ist a eine Constante, die man eliminiren kann, wenn man bedenkt, dass auch der Punkt $\xi = 1$, $\eta = 1$, in

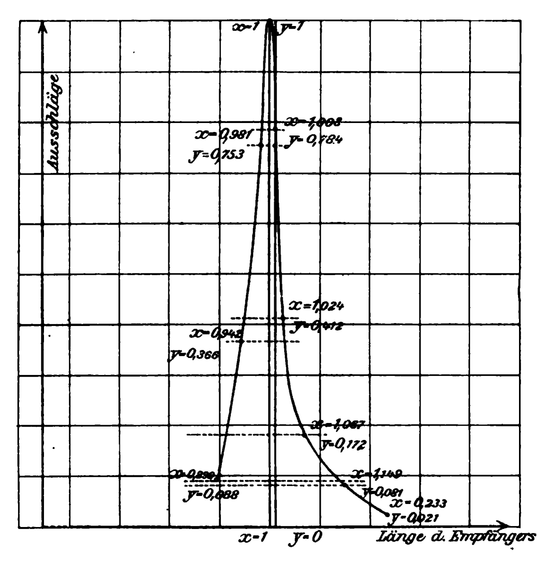


Fig. 7. Beispiel.

dem die Sehne verschwindet, der Hyperbel angehören muss, dass also die Gleichung besteht

$$a = 1 - X\,.$$

Führt man diesen Wert in die obige Gleichung ein, so erhält man:

$$(\xi - X)\,.\,\eta = 1 - X$$

oder

$$X = \frac{1 - \xi\,\eta}{1 - \eta}\,.$$

Diese Gleichung ist dazu geeignet, den unbekannten Asymptotenabstand X aus den gezeichneten Hyperbelpunkten (ξ, η) zu berechnen. Es ergaben sich für X die in der dritten Columne der Tab. 1 aufgeführten Werte.

Tabelle 1.

$\xi = 0{,}997$	$\eta = 0{,}784$	$X = 1{,}011$
0,996	0,753	1,012
0,985	0,412	1,011
0,984	0,366	1,011
0,988	0,172	1,004
1,025	0,091	0,998
1,026	0,088	0,997

Diese Tabelle zeigt, dass man nur aus den Punkten des spitzen Teiles der Curve einen constanten Wert $X = 1{,}011$ für den Asymptotenabstand erhält. Diese Grösse X ist die Isochronitätslänge des Empfängers (vgl. oben p. 20); sie beträgt im vorliegenden Falle, in Centimetern ausgedrückt:

$$1{,}011 . 239 = 242 \text{ cm},$$

weil die Resonanzlänge 239 cm betrug.

Zur Berechnung des Decrementes können nur die Punkte unserer Resonanzcurve verwendet werden, die in der Nähe der Resonanzstelle, d. h. in dem spitzen Teile der Curve liegen. Bei der Berechnung muss man die Länge der zur Abscisse X gehörigen Ordinate Y kennen. Dieselbe lässt sich aus der Fig. 7 nicht mit völliger Genauigkeit ablesen.

Nimmt man in erster Annäherung an, sie sei bei dem vorliegenden Beispiel $Y' = 0{,}73$, so ergeben die Sehnen, welche durch die beobachteten Punkte der Abscissenaxe parallel gelegt werden, für die Abschnitte a, b, c, d der Construction die in den ersten vier Columnen der Tab. 2 angegebenen Längen. Aus ihnen erhält man nach der Formel

$$\omega = \frac{\pi}{X}\sqrt{\frac{a\,b\,c}{d}}$$

in erster Annäherung für die Decremente ω die in der fünften Columne der Tab. 2 verzeichneten Werte ω', deren Mittelwert $\omega'' = 0{,}110$ ist.

Die mangelhafte Uebereinstimmung der berechneten Werte ω' rührt offenbar daher, dass die Ordinate Y nicht genau genug abgelesen worden ist; denn kleine Aenderungen derselben üben bereits einen beträchtlichen Einfluss auf den Wert von ω aus.

Um eine bessere Annäherung an den wahren Wert von Y zu erhalten, habe ich nun aus dem in erster Annäherung ge-

fundenen Durchschnittswerte $\omega'' = 0{,}11$ für jeden der zur Berechnung von ω' herangezogenen Punkte berechnet, welchen Wert Y'' die Grösse Y in jedem einzelnen Falle hätte besitzen müssen, damit man durchgängig den Wert $\omega' = 0{,}11$ gefunden hätte.

Y ist gleich $c + d$ (vgl. Fig. 3), c ist aber ebenso wie a und b für jeden Punkt eine bestimmte Grösse; es kann also für die einzelnen Punkte der Betrag d' berechnet werden, der das Decrement 0,11 geliefert hätte. Die Grössen d' sind aus der Formel

$$\omega'' = \frac{\pi}{X} \cdot \sqrt{\frac{a\,b\,c}{d'}} \quad \text{oder} \quad d' = \frac{a\,b\,c\,.\,\pi^2}{\omega''^2\,.\,X^2}$$

für die einzelnen Punkte berechnet worden und in der sechsten Columne der Tab. 2 enthalten.

Tabelle 2.

$a =$	$b =$	$c =$	$d =$	$\omega' =$	$d' =$	$Y'' =$	$d'' =$	$\omega'' =$
0,025	−0,003	0,784	−0,054	0,103	−0,047	0,737	−0,080	0,084
0,028	−0,002	0,753	−0,023	0,133	−0,034	0,719	−0,049	0,092
0,065	+0,013	0,412	+0,318	0,103	+0,280	0,692	+0,292	0,107
0,069	+0,015	0,366	+0,364	0,101	+0,304	0,668	+0,338	0,104

Um das zugehörige c vermehrt, ergeben diese Grössen d' diejenigen Beträge Y'' (vgl. siebente Columne der Tab. 2), die man für Y hätte annehmen müssen, um immer den Wert $\omega' = 0{,}11$ zu erhalten.

Das Mittel $Y''' = 0{,}704$ aus diesen Grössen Y'' wurde nunmehr in zweiter Annäherung gleich Y gesetzt, und die alten Rechnungen wurden mit dieser Abänderung wiederholt. Dabei blieben die Grössen X, a, b, c dieselben wie früher, nur d erhält die neuen Werte $Y''' - c = d''$ (vgl. achte Columne der Tab. 2).

Nunmehr erhielt man die Decremente ω'' (letzte Columne der Tab. 2) mit dem Mittelwerte $\omega = 0{,}097$.

Man sieht, dass die Grössen ω'' weniger untereinander verschieden sind als die in erster Annäherung gefundenen Decremente ω'; denn die Differenz zwischen dem grössten und dem kleinsten Werte ist bei diesen 0,032, bei jenen nur 0,020.

Man müsste dieses Verfahren beliebig oft wiederholen und so bis zu jedem gewünschten Grade der Genauigkeit ω

bestimmen können, wenn die beobachtete Resonanzcurve ganz genau die Form der theoretischen hätte.

Die Grenzen der Beobachtungsgenauigkeit machen sich aber hier insofern geltend, als sich bei fortgesetzter Anwendung des Näherungsverfahrens die Grenzen, zwischen denen das Decrement schwankt, schliesslich nicht mehr verengern. Im vorliegenden Falle berechnet man schon bei dem zweiten Versuche einer Annäherung die Decremente 0,111, 0,164, 0,094, 0,099.

Der Mittelwert aus den in die engsten Grenzen eingeschlossenen Decrementen, die man bei fortgesetzter Anwendung des beschriebenen Näherungsverfahrens erreichen konnte, wurde als der beste angenommen, weil zu erwarten ist, dass er dem genauesten Werte von Y entspricht.

Die engsten Grenzen, die man für den Wert der Decremente finden kann, geben ein Bild von der Genauigkeit, mit der man im günstigsten Falle das Beobachtungsmaterial nach der Methode von Bjerknes verwerten kann. Diese engsten Grenzen liessen sich in den meisten Fällen mit der zweiten Annäherüng erreichen.

In derselben Weise wie bei diesem durchgeführten Beispiel wurde das Decrement bestimmt, wenn der Abstand zwischen Erreger und Empfänger nicht 1,5 m, sondern einmal 1 m und ein anderes Mal 2 m gross war. Für jede dieser Aufstellungen wurden aus dem Beobachtungsmaterial mindestens drei der am besten untereinander übereinstimmenden Resonanzcurven gewählt, und aus ihnen wurde der Mittelwert genommen. Für die mittlere Curve wurde die Bjerknes'sche Hyperbelasymptote berechnet, und es ergab sich bei 1 m Abstand zwischen Erreger und Empfänger die Isochronitätslänge 1,012, bei 2 m Abstand 1,008; aber wieder waren diese Werte nur im spitzen Teile der Resonanzcurve constant (vgl. oben p. 24 und 31).

Die Bjerknes'sche Construction ist also nur im spitzen Teile der Resonanzcurve gültig.

Das mittlere logarithmische Decrement wurde in der angegebenen Weise mit der grössten erreichbaren Genauigkeit bestimmt; im ersten Falle (Entfernung 1 m) ergab sich die Zahl 0,161, im zweiten (Entfernung 2 m) 0,077. Die Genauig-

keit dieser Werte ist (wie auch bei dem in 1,5 m erhaltenen Werte 0,097) 10—12 Proc.

Auch die erste Oberschwingung ergab für die Bjerknes'sche Construction brauchbare Resonanzcurven. Es wurde wieder das Mittel aus drei bis fünf Curven zur Construction benutzt, und nur der spitze Teil der mittleren Curve ergab eine constante Isochronitätslänge.

Beobachtungen wurden angestellt in 20, 25 und 30 cm Entfernung zwischen Erreger und Empfänger. Als Isochronitätslängen ergaben sich die Werte 1,012 bez. 1,012 bez. 1,008. Als zugehörige mittlere Decremente wurden gefunden: $\omega = 0,222$ bez. 0,107 bez. 0,091. Die Fehlergrenze beträgt hier etwa 15 Proc. in den beiden ersten, 12 Proc. im letzten Falle.

Die Abnahme des mittleren Dekrementes mit wachsender Entfernung zwischen Erreger und Empfänger ist also sehr bedeutend (vgl. oben p. 29).

In Centimetern ausgedrückt war die beobachtete Resonanzlänge für die Grundschwingung stets 239 cm, für die erste Oberschwingung 61 cm. Die Isochronitätslänge berechnet man bei der Grundschwingung für 1, 1,5 und 2 m Entfernung zwischen Erreger und Empfänger zu 240,9, 240,8 und 240,6 cm, bei der ersten Oberschwingung für 20, 25 und 30 cm Abstand zu 61,7, 61,7 und 61,5 cm.

Es ist klar, dass die Isochronitätslängen constant sind in Wirklichkeit, und von der Entfernung zwischen Erreger und Empfänger nicht abhängen können; die kleinen Abweichungen von höchstens 3 mm, welche die Rechnung ergiebt, rühren offenbar daher, dass die Resonanzlängen nicht auf Millimeter genau gemessen werden konnten.

Gegenüber den früher mit der Funkemethode beobachteten Resonanzlängen tritt deutlich der Einfluss der Capacität des Elektrometers hervor. *Bei den Funkenmethoden hatten sich in genauer Uebereinstimmung mit den Dimensionen des Erregers die Resonanzlängen für Grund- und Oberschwingung zu 249 und 83 cm ergeben, während sie bei eingeschaltetem Elektrometer 239 und 61 cm betragen.*

Leider gelang es nicht, in noch grösseren Entfernungen Beobachtungen auszuführen, weil dann die Ausschläge zu klein wurden. Auch konnten die Intensitätsverhältnisse zwischen

Grund- und Oberschwingung darum nicht verglichen werden, weil in der grössten Entfernung, in der die Oberschwingung nachgewiesen werden konnte, etwa bei 45 cm Abstand, die Anwendung eines auf die Grundschwingung abgestimmten Resonators zur Folge hatte, dass die Elektrometernadel bis zur Berührung an den gegenüberliegenden Draht angezogen wurde, und ein lebhaftes Funkenspiel auftrat.

Die Dämpfung des Empfängers muss wesentlich kleiner sein als die des Erregers, weil er keine Funkenstrecke besitzt, und infolge seiner fast geschlossenen Form nur wenig Energie ausstrahlt.

Darum kann man das Dämpfungsdecrement γ des Erregers, ohne einen grossen Fehler zu begehen, dem Doppelten des arithmetischen Mittels ω der Decremente von Erreger und Empfänger gleich setzen; man kann also schreiben $\gamma = 2\,\omega$.

Hiernach ergeben sich aus den bei einem Abstande d aufgenommenen Beobachtungen für die Dämpfungsdecremente γ_g bez. γ_0 der Grund- bez. Oberschwingung die folgenden Werte (vgl. oben p. 33 u. 34):

$d =$	$\gamma_g =$	$d =$	$\gamma_0 =$
1 m	0,321	20 cm	0,444
$1\frac{1}{2}$ m	0,194	25 cm	0,214
2 m	0,154	30 cm	0,182

Die Schwingungen des Erregers sind also um so stärker gedämpft, je näher ihm der Resonator ist.

Vergleicht man diese Decremente mit den sich nach Abraham aus der Maxwell'schen Theorie ergebenden, so gelangt man nur teilweise zu annähernder Uebereinstimmung. Nach Abraham ist das Decrement der Grundschwingung $2{,}37 / \lg \mathrm{nat}\, \alpha$, das der ersten ungeradzahligen Oberschwingung $1{,}17 / \lg \mathrm{nat}\, \alpha$, wobei α das Verhältnis zwischen Länge und Querschnittsradius des geradlinigen Erregers ist, also im vorliegenden Falle gleich $250 / {}^1/_4 = 1000$. Danach ergiebt sich für das Decrement der Grundschwingung die Zahl 0,343, für das der Oberschwingung 0,168.

Merkwürdigerweise ist also für die Grundschwingung das nur unter Rücksicht der Strahlung *berechnete* Decrement des Erregers grösser als das bei grosser Entfernung zwischen Erreger und Empfänger *beobachtete* Decrement.

Für die Oberschwingung stimmt der theoretische Wert der Dämpfung gut überein mit dem bei der grössten Entfernung zwischen Erreger und Empfänger beobachteten Werte. Allerdings konnte hier der Abstand des Empfängers vom Erreger nicht so gross gewählt werden wie bei der Grundschwingung.

Die starke Abweichung zwischen den experimentellen und den theoretischen Ergebnissen bei der Grundschwingung muss man vielleicht durch die störenden Reflexionen der Zimmerwände erklären, welche den Strahlungsverlust des Erregers verringern würden. Da die beobachtete Dämpfung kleiner als die nur unter Rücksicht der Strahlung berechnete ist, so kann man wohl schliessen, dass die *Funkenstrecke des Erregers wesentlich weniger Einfluss auf seine Dämpfung hat als seine Strahlung.*

7. Geradliniger Empfänger.

Einige Beobachtungen mit einem dem Erreger parallelen geradlinigen Empfänger ergaben mit Hülfe des einarmigen Elektrometers, dass die Resonanz am stärksten war, wenn der Empfänger doppelt so lang war wie der Erreger. Dies war zu vermuten, weil die Länge des ganzen Erregers sowie die Länge jeder Hälfte des Empfängers, wenn man von der geringen Capacität des Elektrometers absieht, gleich einer halben Wellenlänge ist.

Das Elektrometer befand sich in der Aequatorebene des Erregers. Die Einstellung war hier ausserordentlich schwierig, weil die störenden elektrostatischen Wirkungen sehr schwer zu vermeiden, und die Ausschläge nur klein waren, sodass sehr bedeutende Unregelmässigkeiten zu stande kamen, wenn die Nadel im geringsten erschüttert wurde.

Es wurde wieder der erste Ausschlag nach Einsetzen des Erregerfunkens notirt; derselbe betrug 1 bis 2 Scalenteile. Da der zehnte Teil eines Millimeters bei der angewandten Fernrohrvergrösserung noch gut zu beobachten war, so erhielt ich trotz des geringen Ausschlages brauchbare Resonanzcurven.

Bei längerer Erregung wurden die Ausschläge ausserordentlich viel grösser[1]), oft 30 bis 40 Scalenteile, aber ganz

1) Durch statische Elektrisirung der Empfängerhälften.

unregelmässig, sodass es ausgeschlossen war, aus ihnen eine Resonanzwirkung herzuleiten.

Die aus den ersten Umkehrpunkten aufgestellte Resonanzcurve ist in Fig. 8 dargestellt mit denselben Abscissen und Ordinaten wie in Fig. 6, p. 28, die Resonanzcurven des kreisförmigen Empfängers.

Die jetzt gefundene Resonanzcurve ist wesentlich flacher als die mit dem kreisförmigen Empfänger erhaltene. *Die Dämpfung des geradlinigen Empfängers ist also wesentlich grösser*

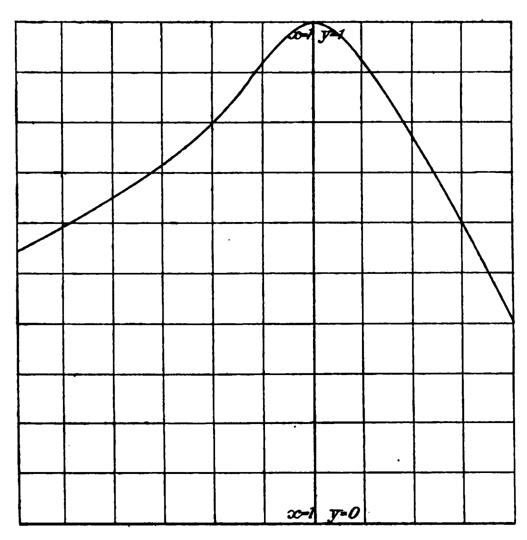


Fig. 8. Resonanz mit einem geradlinigen Empfänger.

als die des kreisförmigen, nahezu geschlossenen Empfängers, wie das auch zu erwarten war wegen der grossen Strahlungsverluste der offenen Leiterform. Die Berechnung der Resonanzcurve ergiebt nach der Methode von Bjerknes für das mittlere Decrement ω den Wert 0,67. Die Curve konnte also noch gebraucht werden, da Bjerknes angiebt, dass seine Methode ohne merkliche Fehler anwendbar ist, solange das mittlere Decrement kleiner ist als 1.

In derselben Entfernung war mit dem kreisförmigen Empfänger für den Erreger das Decrement 0,32 gefunden worden (vgl. oben p. 35); danach ergiebt sich als Decrement des geradlinigen Empfängers $2 . 0,67 - 0,32 = 1,02$, wogegen

die Theorie von **Abraham** für einen 250 cm langen und $^1/_4$ cm dicken Draht das Decrement

$$\frac{2,37}{\operatorname{lognat}\frac{250}{^1/_8}} = 0,378$$

ergiebt. Bei der Beobachtung ist vielleicht ein neuer Fehler dadurch entstanden, dass der Empfängerdraht Stück für Stück mit einer Zange verkürzt wurde, und dass dabei die Enden der Drähte nie gut abgerundet waren. Vgl. dazu die Bemerkung über Büschelentladungen (oben p. 11).

V. Wirkungsweise des Erregers.

1. Zuleitungsfunken.

Mit der bei allen diesen Resonanzversuchen benutzten Anordnung (vgl. Fig. 1) wurden noch einige Beobachtungen über die Stärke der Resonanz bei verschiedener Erregung des primären Funkens angestellt.

Es sei sogleich bemerkt, dass die Resonanzlänge sich mit der Art der Erregung nicht änderte, sondern dass der in 2 m Entfernung aufgestellte kreisförmige Empfänger bei den verschiedenen vorgenommenen Aenderungen der Erregungsweise beste Resonanz immer bei 239 cm Drahtlänge zeigte.

Bisher war der eine Pol der secundären Teslaspule direct an den Erregerdraht in nächster Nähe der Funkenstrecke angelegt worden, während der andere — zur Vermeidung von sprühenden Entladungen mit einer Glasröhre umgebene — Zuleitungsdraht durch eine Funkenstrecke von dem anderen Erregerdrahte getrennt war.

Es wurde nun die Stärke der Wirkung bei verschiedener Grösse dieses Zuleitungsfunkens gemessen, und es zeigte sich, dass sie mit der Länge desselben anwuchs bis zu einem maximalen Elektrometerausschlag[1]) von 7,4 mm; aber schon bei dieser und noch mehr bei weiterer Vergrösserung der Funken-

---

[1]) Es wurde das einarmige Elektrometer benutzt. Bei den zur Berechnung der Dämpfung verwerteten Beobachtungen (vgl. oben p. 29) war der Elektrometerausschlag für Resonanz gleich 5,2 mm.

strecke wurde das Funkenspiel unregelmässig und die Wirkung dementsprechend schlechter.

Dasselbe zeigte sich, wenn der andere, nicht in Glas gehüllte Poldraht eine Funkenstrecke mit dem Erreger bildete, und zwar betrug hier der maximale Ausschlag nur 6,7 mm, weil das Funkenspiel schon eher durch Sprühentladungen gestört wurde.

Ohne Zuleitungsfunken war die Wirkung 4,1 mm; wurde an beiden Polen eine Zuleitungsfunkenstrecke gebildet, so mussten diese Funken sehr klein gewählt werden, damit überhaupt ein regelmässiges Funkenspiel zu stande kam; der grösste Ausschlag war dann 5,0 mm.

2. Righi'sche Erregungsweise.

Die Righi'sche Erregungsweise, bei welcher der Teslastrom durch zwei Funkenstrecken an den äusseren Enden der Erregerdrähte zugeleitet wird, erwies sich als sehr wenig geeignet für Resonanzversuche mit diesen langen Erregerdrähten; denn es waren in der geringen Entfernung von 120 cm keine deutlichen Ausschläge wahrnehmbar, obgleich zur Erregung so hohe Spannungen gewählt wurden, dass die Funkenstrecke der primären Teslaspule 12 mm betrug, und die Zuleitungsfunken je 18 mm lang waren.

3. Erdleitungen.

Einige weitere Beobachtungen hatten den Zweck, über die Wirkungsweise von Erdleitungen Aufschlüsse zu schaffen. Wurde der 250 cm lange Erreger in der gewöhnlichen Weise verwendet und ein auf seine Grundschwingung abgestimmter geradliniger Empfänger benutzt, so zeigte sich, dass, wie man auch die Erdleitungen anbringen mochte, stets eine Verkleinerung der Wirkung eintrat.

Nur in dem Falle, wo ein Erregerdraht und der gegenüberliegende Empfängerdraht abgeleitet waren, zeigte sich eine ganz erhebliche Vergrösserung der Wirkung auf etwa das 300fache. Doch hat man es hier jedenfalls mit einer leitenden Uebertragung der Wellen durch die Gasrohre zu thun, an denen die Erdleitungen angebracht wurden.

VI. Cohärer.

1. Versuchsanordnung.

Am Empfänger wurde an Stelle des Elektrometers ein Cohärer angebracht. Dieser wurde in $3^1/_2$ m Entfernung vom Erreger in seiner Aequatorebene auf einen Paraffinklotz aufgeschmolzen und bestand aus einer mit kleinen Eisenschrauben gefüllten, 5 cm langen und 1 cm dicken Glasröhre, die sich für die gewählte Versuchsanordnung als ganz besonders brauchbar erwies.

Durch Bügel, die in geeignete, mit Quecksilber gefüllte Vertiefungen des Paraffinklotzes gelegt waren, wurde ein Umschalter geschaffen, mit dem der Cohärer entweder zwischen die dem Erreger parallel aufgestellten Empfängerdrähte geschaltet werden konnte[1]) oder in den Stromkreis eines Accumulators hinter ein Milliampèremeter. Die Ausschläge dieses Instrumentes ergaben dann ein Maass für die Widerstandsabnahme des Cohärers.

Vor der elektrischen Bestrahlung hatte der Cohärer einen Widerstand von etwa 3000 Ohm; nach der Bestrahlung wurde der Umschalter vorsichtig umgelegt, sodass keine nachweisbare Vergrösserung des Widerstandes durch Erschütterung stattfand. Durch Klopfen mit einem Glasstabe konnte man dem Cohärer sehr leicht seinen alten Widerstand wiedergeben.

Die Funkenstrecke des primären Teslastromes zeigte einen Einfluss auf den Cohärer, der jedoch durch Stanniol leicht so weit abgeschirmt werden konnte, dass er für die Untersuchungen nicht mehr wesentlich war.

Der Beobachtungsplatz befand sich hinter dem Empfänger; dort war auch der Unterbrecher der primären Inductionsspule aufgestellt. Die Leitung von ihm zum Inductorium war an der Decke des Zimmers entlang geführt, sodass der Raum zwischen Erreger und Empfänger von störenden Leitern weithin völlig frei war.

Als Unterbrecher diente bei diesen Untersuchungen ein einfacher Pendelunterbrecher, der, aus constanter Höhe herabfallend, eine mit Wasser bedeckte Quecksilberoberfläche zwei-

---

1) Während der Bestrahlung bildeten die Empfängerdrähte und der Cohärer ein isolirtes System ohne sonstige angehängte Drahtteile.

mal durchschlug. Es zeigte sich bei sonst gleicher Versuchsanordnung dann immer ziemlich genau dieselbe Wirkung, während bei nur einer Unterbrechung sehr verschiedene Widerstände des Cohärers erhalten wurden, und bei weiteren Unterbrechungen der Widerstand bald grösser, bald kleiner wurde. Der Pendelunterbrecher gab allein ebenso gute Wirkung, als man erhielt, wenn ausserdem noch der Quecksilberturbinenunterbrecher eingeschaltet war.

2. Resonanz langer Wellen.

Mit der beschriebenen Anordnung wurden zunächst die Wellen aufgefangen, welche von dem geradlinigen, 250 cm langen und 0,5 cm dicken, stabförmigen Erreger ausgehen, und zwar mit einem geradlinigen, dem Erreger parallelen, 0,25 cm dicken Empfängerdrahte, dessen Länge durch Abschneiden der Enden immer mehr verkleinert wurde. Die folgende Tabelle stellt eine Beobachtungsreihe dar. In der ersten Columne steht die Länge jedes Empfängerdrahtes in Centimetern[1]), in der zweiten der Ausschlag des Strommessers in Milliampères, und zwar das Mittel aus 10 Beobachtungen, von denen die grösste in der dritten, die kleinste in der vierten Columne verzeichnet ist:[2])

275	242	290	210
250	209	250	140
225	273	290	210
200	309	490	220
175	370	430	350
150	399	440	360
125	626	680	580
100	512	570	420
90	225	290	180
80	213	260	170
70	192	210	140

1) Die Länge des ganzen Empfängers war also doppelt so gross vermehrt, um 15 cm Länge der die Verbindung mit dem Cohärer herstellenden Drahtbügel.

2) Die angelegte elektromotorische Kraft betrug 2 Volt; der Widerstand des Cohärers war also, da sonst kein wesentlicher Widerstand im Strommesskreise lag, im Resonanzfalle:

$$w = \frac{2}{0,626} = 3,2 \ldots \text{Ohm},$$

Es zeigt sich also, dass Erreger und Empfänger etwa gleich lange Drähte besitzen müssen, damit Resonanz eintritt. Der Cohärer wirkt demnach als Leiter oder als Isolator von sehr grosser Capacität.

Mit dem kreisförmigen Empfänger liess sich Resonanz weniger deutlich nachweisen, obgleich seine Länge zwischen 3 und 1 m verändert wurde. Bei diesen Empfängern war aber auch die Cohärerwirkung ungefähr viermal so stark, wenn überhaupt kein Bügel auflag, sodass sie aus diesem Grunde für Resonanzversuche ganz ungeeignet erschienen.

3. Kürzere Wellen.

Zur Untersuchung der Resonanzerscheinung bei kürzeren Wellen wurden als Erregerdrähte zwei 38,5 cm lange und 6 mm dicke Messingdrähte benutzt, die in der üblichen Weise erregt wurden; doch sprangen hier die Funken nicht zwischen Kugeln über, sondern direct zwischen den gut abgerundeten Drahtenden.

Es ergab sich auch hier eine gut ausgebildete Resonanz mit einem geradlinigen, $2^1/_2$ mm starken Empfänger, dessen Drähte zu dem vorhin beschriebenen Cohärer führten, wenn derselbe genau ebenso lang war wie die Erreger, wenigstens wenn man zu der beobachteten Länge noch die Länge der Drahtbügel des Umschalters addirt.

4. Erdleitungen.

Mit einem abgestimmten Empfänger wurde die Wirkung der an den äusseren Enden der Erreger- oder der Resonatordrähte angelegten Erdleitungen untersucht und gleichzeitig der Einfluss von Leydener Flaschen, welche dieselben Dimensionen besassen wie die oben p. 6 beschriebene Flasche. Da die Cohärerwirkung nicht ganz constant war, geschah die Beobachtung in folgender Weise: Es wurden erst ohne Ableitung fünf Beobachtungen angestellt, dann fünf, wenn die zu prüfende Erdleitung angelegt war, darauf zehn, wenn eine Ableitung zu der inneren Belegung einer Leydener Flasche führte, deren äussere Belegung in leitender Verbindung mit der Erde stand; sodann folgten fünf Ablesungen mit und fünf ohne Erdleitung.

Aus den zehn für jeden der drei Fälle angestellten Beobachtungen wurde das Mittel genommen. Wenn dann die Drähte so bezeichnet werden, wie es die Fig. 9 angiebt, und E_1, E_2, R_1, R_2 die Wirkungen sind, wenn e_1, e_2, r_1, r_2 zur Erde, E_1', E_2', R_1', R_2', wenn sie zu den Capacitäten geleitet werden, so ergaben sich, wenn die Stromstärke im Cohärerkreise bei Beobachtungen ohne Ableitungen 100 ist, die folgenden Wirkungen:

$$E_1 = 69,\quad E_2 = 53,\quad R_1 = 52,\quad R_2 = 50,$$

$$E_1' = 64,\quad E_2' = 49,\quad R_1' = 61,\quad R_2' = 64.$$

Dass E_1 von E_2 und E_1' von E_2' ziemlich stark abweicht, während R_1 mit R_2 und R_1' mit R_2' nahezu übereinstimmt,

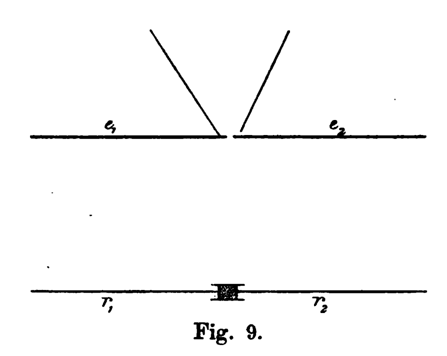


Fig. 9.

rührt offenbar daher, dass infolge der Zuleitungsfunkenstrecke bei e_2 der Erreger eine Unsymmetrie besitzt, die im Resonator nicht vorhanden ist.

Die Zahlen E und R deuten auf die Auffassung hin, dass die Erde einerseits, die Resonanz zerstörend, als Capacität wirkt, andererseits aber auch durch leitende Uebertragung die Wirkung vergrössert; denn wenn nur die Capacität der Erde wirkte, so müsste die Erdleitung Aenderungen in der Intensität des Ansprechens immer im gleichen Sinne hervorrufen wie die angehängte Leydener Flasche. Dies ist aber nicht der Fall; an r_1 und r_2 bewirkt die Erde, an e_1 und e_2 die Flasche eine stärkere Verminderung der Wirkung.

Durch die gleiche Auffassung liessen sich auch die Beobachtungen erklären, die angestellt wurden, wenn zwei Drähte

gleichzeitig abgeleitet waren. Fast immer trat eine Verkleinerung der Wirkung ein; als typisches Beispiel sei angeführt, dass, wenn an e_1 und r_1 Leydener Flaschen angelegt wurden, die Wirkung von 100 auf 33 sank, wenn beide an die Gasleitung gelegt waren, aber nur auf 34,5, und auf 22, wenn e_1 an die Gas-, r_1 an die Wasserleitung gelegt war. Im ersten wie im letzten Falle ist keine oder nur schlechte Leitung zwischen e_1 und r_1 vorhanden. Die vergrösserte Capacität bewirkt durch Zerstörung der Resonanz eine sehr verkleinerte Wirkung. Bei der Anlegung von e_1 und r_1 an die Gasleitung ist aber die durch Capacitätsvermehrung verursachte Verkleinerung der Wirkung wieder etwas verringert, da e_1 und e_2 durch die Gasrohre leitend miteinander verbunden sind.

Der einzige Fall, in dem durch Erdleitung die Wirkung des abgestimmten Empfängers verstärkt wird, tritt ein, wenn beide Empfängerdrähte an die Leitungsröhren gelegt werden; dieses ist aber kein Beobachten mit abgestimmten Empfängern, sondern ein Fall, der dadurch zu erklären ist, dass durch sehr starke Vergrösserung des Empfängers mehr ausgestrahlte Energie des Erregers aufgefangen wird als mit einem kurzen Empfänger, selbst wenn er abgestimmt wird.

Wenn e_1 und r_1 an die inneren Belegungen einer Leydener Flasche gelegt wurden, deren äussere Belegungen leitend mit einander verbunden waren, dann wurde die Wirkung 1,4 mal stärker; ein direct von e_1 nach r_1 gelegter Draht erhöhte sie auf mehr als das Zehnfache, während sie durch einen feuchten Bindfaden etwa um 12 Proc. gesteigert wurde.

Trotzdem es nach diesen Versuchen scheint, dass die Erdleitung niemals so günstig wirkt, als aufeinander abgestimmte isolirte Erreger und Empfänger, so können doch die Verhältnisse bei sehr langen Erregern, wie man sie zur Telegraphie ohne Draht über viele Kilometer benötigt, anders liegen, da in diesem Falle der Erreger zweckmässig vertical gestellt wird und der isolirte Erreger sehr viel länger als die kurze Erdleitung ist.

Ich hoffe die Untersuchungen über die Resonanz und die Dämpfung der elektrischen Wellen eingehender nach der Methode von Bjerknes mit dem Cohärer fortzusetzen; namentlich soll dabei durch Beobachten im Freien die Fehlerquelle mög-

lichst vermieden werden, die im Zimmer die Reflexion der Wände verursacht.

Resultate:

1. Ausser der Grundschwingung sendet ein stabförmiger Erreger harmonische Oberschwingungen aus, deren Perioden ungeradzahlige Bruchteile von der Periode der Grundschwingung sind. Acht solcher Oberschwingungen wurden nachgewiesen.

2. Erreger von nicht stabförmiger Gestalt senden ebenfalls neben der Grundschwingung Oberschwingungen aus; die Perioden derselben sind aber nicht harmonisch.

3. Die Knoten- und die Bauchflächen der magnetischen Kraft in der Umgebung des stabförmigen Erregers sind näherungsweise entsprechend der theoretischen Berechnung von Abraham gefunden worden, d. h. sie sind annähernd Rotationshyperboloide, deren Brennpunkte die äusseren Enden der Erregerdrähte sind, deren Scheitelpunkte den Erreger in gleich grosse Teile zerlegen.

4. Die Dämpfung der vom Erreger ausgehenden Schwingungen ist um so grösser, je kleiner der Abstand zwischen Erreger und Empfänger ist.

5. Für die Grundschwingung ergiebt sich in 2 m Entfernung das logarithmische Decrement 0,154, für die erste Oberschwingung bei 30 cm Abstand zwischen Erreger und Empfänger der Wert 0,182. Die Genauigkeit dieser Werte beträgt 10—15 Proc.

6. Die Ursache der Dämpfung ist mehr in der Energiestrahlung zu erblicken als in der Entwickelung Joule'scher Wärme im Erregerfunken.

7. Ein geradliniger Empfänger zeigt eine weniger scharfe Resonanz als ein kreisförmiger Empfänger.

8. Mit dem Cohärer lässt sich Resonanz gut nachweisen; doch eignet sich hierzu nicht ein kreisförmiger Empfänger. Ein abgestimmter geradliniger Resonator ist ebenso lang wie der Erreger.

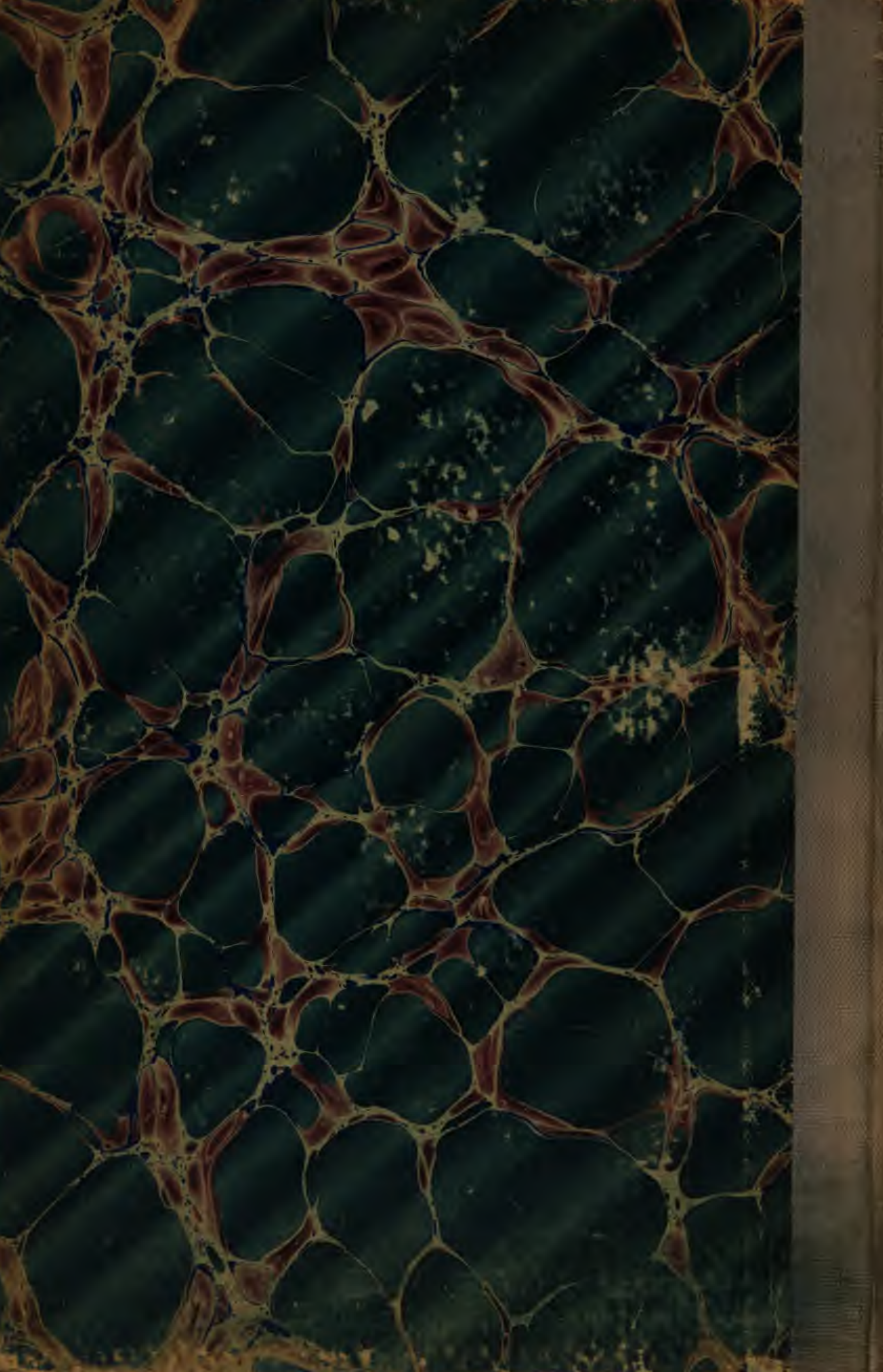
Der Cohärer wirkt entweder als Leiter oder als Isolator von grosser Capacität.

9. Legt man an je ein äusseres Ende der geradlinigen Erreger- oder Resonatordrähte eine Erdleitung an, so wird stets

die Resonanzerscheinung zerstört und damit die Wirkung der elektrischen Wellen auf den Cohärer verkleinert, obgleich eine nachweisbare leitende Uebertragung der Schwingungen durch die Erdleitung vorhanden ist.

Die vorliegende Abhandlung ist eine Darstellung von Untersuchungen, die ich im Physikalischen Institut der Universität Leipzig begonnen und in Giessen fortgesetzt habe. Meinem hochverehrten Lehrer und Chef, Hrn. Professor Dr. P. Drude, bin ich für die Anregung zu diesen Untersuchungen sowie für zahlreiche gütige Unterstützungen zu grösstem Danke verpflichtet. Auch Hrn. Professor Dr. O. Wiener bin ich sehr dankbar für seine an dieser Arbeit genommene anregende Teilnahme.

Lebenslauf.

Ich, Franz Kiebitz, wurde am 20. Juni 1878 zu Bautzen geboren und bin ein Sohn des daselbst verstorbenen Realschuloberlehrers Professor Gustav Kiebitz. Nach dreijährigem Besuche der Vorbereitungsschule meiner Vaterstadt wurde ich Ostern 1887 in die dortige Realschule aufgenommen. Mit dem Reifezeugnis derselben trat ich Ostern 1893 in die Obersecunda des Königlichen Realgymnasiums zu Zittau ein; dieses verliess ich nach bestandener Maturitätsprüfung Ostern 1896, um mich in Leipzig dem Studium der Mathematik, Physik und Chemie zu widmen. Michaelis 1899 wurde ich Assistent bei Hrn. Professor Dr. P. Drude und folgte ihm als solcher Ostern 1900 nach Giessen.

140141
QC665
K5